



**University of
Zurich**^{UZH}

**Zurich Open Repository and
Archive**

University of Zurich
University Library
Strickhofstrasse 39
CH-8057 Zurich
www.zora.uzh.ch

Year: 2019

Anwendungen der induzierten Polarisierung in der Archäologischen Prospektion

Ullrich, B ; Kniess, R ; Rücker, C ; Turck, Rouven

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-178557>

Journal Article

Published Version

Originally published at:

Ullrich, B; Kniess, R; Rücker, C; Turck, Rouven (2019). Anwendungen der induzierten Polarisierung in der Archäologischen Prospektion. DGG Kolloquium, 1(2019):49-58.

Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e.V.

Inhalt

Weller, A. (*Technische Universität Clausthal*):

Induzierte Polarisierung – eine Einführung

Börner, J. H., Herdegen, V. (*Technische Universität Bergakademie Freiberg*) und Kummerow, J., Raab, S. und Spangenberg, E. (*Geoforschungszentrum Potsdam*):

Spektrale Induzierte Polarisierung reaktiver Systeme unter Reservoirbedingungen

Flores-Orozco, A. (*Technische Universität Wien*), Bucker, M. (*Technische Universität Braunschweig*), Rücker, C. (*Technische Universität Berlin*), Kemna, A. (*Universität Bonn*) und Frank Börner (*Technische Universität Berlin*):

Applications of induced polarization imaging for site characterization and the evaluation of remediation techniques methods and applications

Tauchnitz, M., Kopp, D. und Brauch, K. (*terratec Geophysical Services GmbH & Co. KG*):

Hochauflösende Tiefengeoelektrik und Zeitbereichs IP Messungen zur Unterstützung der Erzexploration in Afrika

Ullrich, B., Kniess, R. (*eastern Atlas GmbH & Co. KG*), Rücker, C. (*Technische Universität Berlin*) und Turck, R. (*Universität Zürich*):

Anwendungen der Induzierten Polarisierung in der Archäologischen Prospektion

Martin, T. (*Universität Lund*), Weigand, M. (*Universität Bonn*) und Flores-Orozco, A. (*Technische Universität Wien*):

Induzierte Polarisierung in der Biogeophysik

MITTEILUNGEN



DGG- Kolloquium

Induzierte Polarisation

Braunschweig, 6. März 2019

Sonderband I/2019
ISSN 0947-1944

Herausgeber:
Deutsche Geophysikalische
Gesellschaft e.V.

IMPRESSUM

Herausgeber: Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e.V.
Telegrafenberg, 14473 Potsdam

Redaktion: Arbeitskreis „Angewandte Geophysik“
Dr. Hui Ding, Peine
Dr. T. Fechner, Neuwied
Dr. T. Litwinska-Kemperink, Oldenzaal
Dr. M. Müller-Petke, Hannover
Prof. Dr. M. Joswig, Stuttgart
Dr. D. Orlowsky, Essen
Dr. A. Schuck, Leipzig (Sprecher)

Kontakt:

Dr. A. Schuck
GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH
Bautzner Str. 67, 04347 Leipzig
Tel. 0341/2421-310, andreas.schuck@ggl-gmbh.de

DGG-Kolloquium

Induzierte Polarisation

79. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft e.V.

Braunschweig, 06. März 2019

Weller, A. (*Technische Universität Clausthal, Institut für Geophysik*):

Induzierte Polarisation – eine Einführung 3

Börner, J. H., Herdeggen, V. (*Technische Universität Bergakademie Freiberg*) und
Kummerow, J., Raab, S. und Spangenberg, E. (*Geoforschungszentrum Potsdam*):

Spektrale Induzierte Polarisation reaktiver Systeme unter Reservoirbedingungen 13

Flores-Orozco, A. (*Technische Universität Wien*),
Bücker, M. (*Technische Universität Braunschweig*), Rücker, C. (*Technische Universität Berlin*),
Kemna, A. (*Universität Bonn*) and Frank Börner (*Technische Universität Berlin*):

Applications of induced polarization imaging for site characterization and the
evaluation of remediation techniques methods and applications 27

Tauchnitz, M., Kopp, D. und Brauch, K. (*terratec Geophysical Services GmbH & Co. KG*):

Hochauflösende Tiefengeoelektrik und Zeitbereichs IP Messungen zur
Unterstützung der Erzexploration in Afrika 37

Ullrich, B., Kniess, R. (*eastern Atlas GmbH & Co. KG*),
Rücker, C. (*Technische Universität Berlin*) und Turck, R. (*Universität Zürich*):

Anwendungen der Induzierten Polarisation in der Archäologischen Prospektion 49

Martin, T. (*Universität Lund*), Weigand, M. (*Universität Bonn*)
und Flores-Orozco, A. (*Technische Universität Wien*):

Induzierte Polarisation in der Biogeophysik 59

Induzierte Polarisation – eine Einführung

Andreas Weller

Technische Universität Clausthal
Institut für Geophysik
Arnold-Sommerfeld-Str. 1
38678 Clausthal-Zellerfeld
E-Mail: andreas.weller@tu-clausthal.de

1. Zusammenfassung

Die Induzierte Polarisation (IP) gilt seit mehreren Jahrzehnten als attraktives Forschungsfeld, da sie die Möglichkeit bietet, Grenzflächeneigenschaften von Geomaterialien zu untersuchen. Die IP-Methode wird neben ihrer klassischen Anwendung zur Erkundung mineralischer Rohstoffe nun auch verstärkt in der Hydrogeologie, den Umweltwissenschaften, der Geotechnik, der Biotechnologie und in der Archäologie eingesetzt. Obwohl seit der Entdeckung der Induzierten Polarisation durch Conrad Schlumberger schon mehr als 100 Jahre vergangen sind, gibt es noch keine umfassende Theorie, die die physikalischen und chemischen Effekte der Induzierten Polarisation vollständig beschreibt.

Auf der Grundlage von Laboruntersuchungen sind zahlreiche Zusammenhänge zwischen IP-Parametern und petrophysikalischen Kenngrößen gefunden worden, die dazu beitragen, die Interpretation von IP-Messungen hinsichtlich einer lithologischen Charakterisierung zu verbessern. Es sind Algorithmen entwickelt worden, die eine Permeabilitätsabschätzung auf der Grundlage von IP-Parametern ermöglichen.

2. Geschichte der Induzierten Polarisation

Das Phänomen der induzierten Polarisation (IP) wurde von Conrad Schlumberger bei seinen geoelektrischen Messungen mit Gleichstrom im Jahr 1911 entdeckt (Collet, 1990). Nachdem der Stromfluss zu den beiden einspeisenden Elektroden unterbrochen wurde, konnte ein langsames Abklingen des zwischen zwei Potentialelektroden gemessenen Spannungswertes beobachtet werden, das nicht allein durch die Trägheit der zu dieser Zeit verwendeten Galvanometer bedingt war. Der Boden zeigt eine Art kapazitives Verhalten, d.h. es erfolgt eine Aufladung oder Ladungstrennung bei geschlossenem Stromkreis. Nach dem Abschalten des Stromes kommt es zu einer Entladung, wobei die Ladungstrennung oder Polarisation wieder aufgehoben wird. Die erste Veröffentlichung von Schlumberger (1920) zur induzierten Polarisation unter der französischen Bezeichnung „polarisation provoquée“ erklärte den Polarisationseffekt von Erzkörpern mit der Elektrolyse von Wasser an metallischen Leitern. Schlumberger verglich die Wirkung von Erzkörpern im Untergrund mit Batterien, die aufgeladen und entladen werden können. Allerdings dauerte es mehr als drei Jahrzehnte, bis über erste erfolgreiche Anwendungen von IP-Messungen zur Erzerkundung berichtet wurde (z.B. Bleil, 1953; Wait, 1959). Die IP-Methode etablierte sich in den nachfolgenden Jahrzehnten als anerkanntes geophysikalisches Erkundungsverfahren, das neben einer Lokalisierung von Erzkörpern auch eine quantitative Charakterisierung der Erzminerale durch verschiedene Parameter erlaubt (z.B. Pelton et al., 1978). Die erfolgreiche Anwendung bei der Erzerkundung hat ihre Ursache in der Tatsache, dass viele Erzkörper sehr starke Polarisationseffekte zeigen, die mit der verfügbaren Messtechnik sicher nachzuweisen waren. Die Weiterentwicklung der Messtechnik erlaubte später die Auflösung kleinerer IP-Effekte. Dabei wurde erkannt, dass auch erzfreie Gesteine Polarisationseffekte zeigen, die deutlich schwächer und demzufolge auch schwerer nachzuweisen sind. Marshall & Madden (1959) stellten eine Theorie für diesen schwächeren Polarisationseffekt vor, der als Membranpolarisation bezeichnet wird. Als eine Ursache für die Membranpolarisation wurden Tonminerale identifiziert, die die elektrolytische Leitung im Porenraum beeinflussen.

Vinegar & Waxman (1984) beschrieben diese Effekte und ihre Auswirkungen auf das Polarisationsverhalten von tonigen Sandsteinen. Sie untersuchten die Abhängigkeit der IP-Effekte von petrophysikalischen Parametern und schufen damit die Grundlage für eine quantitative Auswertung von IP-Messungen, die zumeist auf empirischen Beziehungen beruhte. Beginnend in den 1980er Jahren untersuchten zahlreiche Studien den Einfluss der Zusammensetzung des Porenfluids auf den IP-Effekt von Lockersedimenten, um festzustellen, ob die IP-Methode zum Nachweis von Kontaminationen geeignet ist (z.B. Olhoeft, 1986; Vanhala et al., 1992; Börner et al., 1993). Mit diesen Untersuchungen wurde ein wichtiger Beitrag geleistet, um für die IP-Methode neben ihrer klassischen Anwendung in der Erzprospektion neue Anwendungsfelder im Umweltbereich und der Hydrogeologie zu erschließen.

In den letzten beiden Jahrzehnten wurden die Forschungsarbeiten zur IP deutlich intensiviert. Es wurden zahlreiche mechanistische und empirische Modelle zur Erklärung der Ursachen und zur Beschreibung von Messeffekten vorgestellt. Für das Verfahren wurden neue Anwendungsfelder erschlossen. Zahlreiche Studien befassen sich mit dem Monitoring von biologischen oder chemischen Prozessen. Die IP-Methode wurde auch erfolgreich bei der Untersuchung von archäologischen Strukturen (Schlackenhalden, Holzwegen) eingesetzt.

Das wachsende Interesse an der IP-Methodik führt auch zu einer besseren Vernetzung der Wissenschaftler und Institutionen, die an dieser Thematik arbeiten. Im Jahre 2005 wurde der Arbeitskreis Induzierte Polarisation in der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft eingerichtet, der mit Arbeitstreffen und Workshops den wissenschaftlichen Austausch fördert. Auf Initiative des Arbeitskreises IP werden seit 2009 auch internationale Workshops durchgeführt, die maßgeblich zur Intensivierung der Kooperation in der IP-Forschung beitragen.

3. Ursachen der Induzierten Polarisation

Verschiedene Böden und Gesteine zeigen ein recht unterschiedliches Polarisationsverhalten. Besonders stark ausgeprägt sind die Polarisierungseffekte bei Erzen oder auch bei metallischen Objekten im Untergrund. Diese Erscheinung entspricht der aus der Elektrochemie bekannten Elektrodenpolarisation, die auftritt, wenn ein Wechsel von elektronischer in elektrolytische Leitung stattfindet. Um den Ladungstransport über die Oberfläche eines Elektronenleiters zu gewährleisten, muss eine chemische Reaktion ablaufen, die den Ladungstransport verzögert und zur Ausbildung einer Überspannung (englisch: *Overvoltage*) führt. Diese Überspannung oder sekundäre Spannung wird beim Abschalten des Stromflusses wieder abgebaut (Wait, 1959).

Auch wenn ein Grundverständnis für die Polarisation von Gesteinen mit elektronisch leitenden Partikeln vorhanden ist, liefern aktuelle Publikationen unterschiedliche Hypothesen für eine detaillierte Erklärung der auftretenden Effekte. Während die eine Theorie die IP-Effekte allein durch die Verschiebung von positiven und negativen Ladungen im Leiter durch den Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes erklärt (z.B. Revil et al., 2015; Misra et al. 2016), erfordern andere Modelle (z.B. Gurin et al., 2015) einen elektrischen Kontakt und Grenzflächenprozesse zwischen dem Leiter und dem Porenwasser.

Doch auch Gesteine ohne Erzminerale zeigen messbare IP-Effekte, die aber meistens deutlich kleiner sind. Eine Reihe von Modellen sieht die Ursache für die Polarisation in der elektrolytischen Doppelschicht (englisch: *electrical double layer*, EDL), die sich an der Phasengrenze zwischen den festen Gesteinsbestandteilen (Mineralen) und dem Porenfluid ausbildet. Da die meisten gesteinsbildenden Minerale eine negativ geladene Oberfläche aufweisen, lagern sich an diese positiv geladenen Ionen an. Unmittelbar an der Oberfläche bildet sich eine starre Schicht aus, die auch als Stern-Schicht bezeichnet wird und aus adsorbierten Gegenionen besteht. Da durch die Stern-Schicht das negative Potenzial der Mineraloberfläche nur teilweise kompensiert wird, bildet sich an die Stern-Schicht

angrenzend eine diffuse Schicht mit abnehmender Konzentration der Gegenionen aus. Die in der EDL vorhandene höhere Ionenkonzentration führt zur Grenzflächenleitfähigkeit σ_{surf} , die sich parallel zur elektrolytischen Leitfähigkeit im Porenraum ausbildet. Die Ladungsverteilung in der EDL ändert sich beim Anlegen eines elektrischen Feldes. Es kann in kornbasierte oder auch porenraumbasierte Modelle unterschieden werden. Die kornbasierten Modelle gehen davon aus, dass das elektrische Feld eine tangentielle Verschiebung der Gegenionen in der Sternschicht verursacht und damit eine Polarisation eines Einzelkorns bewirkt (z.B. Revil & Florsch, 2010). Die porenraumbasierten Modelle führen die Polarisation auf die unterschiedliche Beweglichkeit der Kationen und Anionen in Poren unterschiedlicher Größe zurück. Diese Art der Polarisation wird auch als Membranpolarisation bezeichnet (z.B. Marshall & Madden, 1959; Bückner & Hördt, 2013).

Neben den Polarisationsprozessen, die im Gestein durch Elektronenleiter (Elektrodenpolarisation) oder durch die unterschiedliche Beweglichkeit von Ionen im Porenraum (Membranpolarisation) hervorgerufen werden, müssen insbesondere bei höheren Frequenzen weitere Effekte berücksichtigt werden. Dazu gehört die Maxwell-Wagner-Polarisation, die an Grenzflächen zwischen Gesteinsbestandteilen mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften auftritt. Bei höheren Frequenzen entstehen zusätzliche Effekte durch die elektromagnetische Induktion und die dielektrischen Eigenschaften der Gesteinsbestandteile. Neben den Polarisierungseffekten im Gestein treten auch elektromagnetische Kopplungseffekte (induktiv und kapazitiv) auf, die durch die Messkonfiguration (z.B. Anordnung der Kabel) sowohl bei Labor- als auch bei Feldmessungen verursacht werden. Eine sachgemäße Interpretation der IP-Messungen setzt voraus, dass die intrinsischen Polarisierungseffekte des Gesteins von den elektromagnetischen Kopplungseffekten getrennt werden. Für diese Trennung wurden Algorithmen mit entsprechenden Annahmen über das hochfrequente Verhalten der Kopplungseffekte entwickelt (z.B. Pelton et al., 1978).

Es sollte darauf hingewiesen werden, dass auch bei einem Stromfluss durch organische Substanzen (z.B. Torf, Holz, Kohle) Polarisierungseffekte hervorgerufen werden (z.B. Comas & Slater, 2004; Martin, 2012). Ebenso können Bakterien oder bakterieninduzierte Prozesse einen Einfluss auf das Polarisierungssignal haben (Atekwana & Slater, 2009).

4. Messmethoden

Bei Messungen der induzierten Polarisation im Zeitbereich wird eine Folge von positiven und negativen Gleichstrompulsen in den Untergrund eingespeist, wobei zwischen den Pulsen der Strom für eine kurze Zeit abgeschaltet wird. In dieser Zeit klingt die sekundäre Spannung ab. Das Abklingverhalten kann durch Spannungsmessungen zu bestimmten Zeiten als $U_s(t)$ oder in einzelnen Zeitfenstern erfolgen. Dabei wird die gemessene sekundäre Spannung U_s auf die primäre Spannung U_0 , die während der Einschaltphase registriert wird, normiert. Eine Zeitbereichsmessung in einem bestimmten Zeitfenster von t_i bis t_{i+1} nach dem Abschalten des Stromsignals zum Zeitpunkt $t = t_0 = 0$ s liefert die Aufladbarkeit (Sumner, 1976)

$$M_i = \frac{1}{U_0} \int_{t_i}^{t_{i+1}} U_s(t) dt, \quad (1)$$

wobei die Maßeinheit der so definierten Aufladbarkeit M eine Zeit ist. Moderne Messgeräte liefern die Aufladbarkeit M in vielen Zeitfenstern, wodurch der Verlauf der Abklingkurve $U_s(t)$ rekonstruiert werden kann. Die Gesamtaufladbarkeit ergibt sich bei einer Integration von t_0 bis unendlich. Es muss beachtet werden, dass zusätzlich eine dimensionslose Aufladbarkeit m durch das Verhältnis $U_s(t_0)/U_0$ definiert wird. Da unmittelbar nach dem Abschalten des Stromsignals transiente elektromagnetische Effekte die IP-Messungen überlagern, kann die sekundäre Spannung $U_s(t)$ erst nach einer Totzeit von einigen Millisekunden registriert werden. Daher ist die Aufladbarkeit m nicht direkt messbar und kann nur durch Extrapolation

bestimmt werden. Es kann angenommen werden, dass sich die Abklingkurve $U_S(t)$ aus mehreren (z.B. n) Komponenten zusammensetzt, die jeweils als Exponentialfunktion mit unterschiedlichen Relaxationszeiten τ_i und Amplituden V_i beschrieben werden:

$$V_S(t) = \sum_{i=1}^n V_i \exp(-t/\tau_i). \quad (2)$$

Die Darstellung in Gleichung 2 entspricht einer Debye-Zerlegung im Zeitbereich und liefert eine diskrete Verteilung der Relaxationszeiten. Es wird angenommen, dass jede Relaxationszeit einen Diffusionsprozess beschreibt. Aus der Relaxationszeit kann bei Kenntnis der Diffusionskonstanten eine charakteristische Länge abgeleitet werden. Unter der Annahme, dass einzelne kugelförmige Partikel aufgeladen werden, verhält sich die Relaxationszeit proportional zum Quadrat des Partikelradius, der in diesem Fall als charakteristische Länge betrachtet wird. Unter idealen Bedingungen könnte aus der Relaxationszeitverteilung die Korngrößenverteilung bestimmt werden.

Bei Messungen im Frequenzbereich wird meistens mit einem sinusförmigen Wechselstrom gearbeitet. Ein als Messgerät verwendetes Impedanz-Spektrometer liefert die Amplitude der Impedanz $|Z|$ und die Phasenverschiebung φ zwischen dem Spannungssignal U^* und dem Stromsignal I als Funktion der Frequenz f . Die Impedanz ist ein komplexwertiger Widerstand (Maßeinheit Ω), der sich durch einen Real- (Z') und einen Imaginärteil (Z'') darstellen lässt:

$$Z(f) = \frac{U^*(f)}{I(f)} = Z'(f) + iZ''(f), \quad (3)$$

wobei $i = \sqrt{-1}$ die imaginäre Einheit darstellt. Der Realteil Z' beschreibt den Teil des Widerstandes, der mit dem anregenden Stromsignal in Phase ist. Der Imaginärteil Z'' beschreibt den um 90° phasenverschobenen Anteil. Aus einer Darstellung der Impedanz in einer komplexen Zahlenebene folgt für die Amplitude

$$|Z| = \sqrt{Z'^2 + Z''^2} \quad (4)$$

und die Phasenverschiebung oder auch Phasendifferenz zwischen dem Spannungs- und Stromsignal $\varphi = \varphi_{UI} = \varphi_U - \varphi_I$:

$$\varphi = \arctan \frac{Z''}{Z'}. \quad (5)$$

Da bei IP üblicherweise kapazitive Effekte beobachtet werden und damit das Spannungssignal dem Stromsignal zeitverzögert folgt, gilt $\varphi_U < \varphi_I$ und damit $\varphi = \varphi_{UI} < 0$, d.h. der Phasenwinkel und damit auch der Imaginärteil der Impedanz werden negativ. Aus der komplexwertigen Impedanz wird durch Multiplikation mit dem Konfigurationsfaktor K ein komplexwertiger spezifischer elektrischer Widerstand (Maßeinheit Ωm) berechnet

$$\rho^* = \frac{U^*}{I} K = ZK, \quad (6)$$

der sich auch aus einem Real- und Imaginärteil zusammensetzt

$$\rho^* = \rho' + i\rho'' = |\rho^*| \exp(i\varphi) \quad (7)$$

und sich in gleicher Weise wie die Impedanz auch als Amplitude $|\rho^*|$ und Phasenwinkel φ darstellen lässt. Der Phasenwinkel des spezifischen elektrischen Widerstandes ist mit dem Phasenwinkel der Impedanz identisch, wie man aus Gleichungen 5 und 6 erkennt.

Für zahlreiche Anwendungen ist es sinnvoll, anstelle des spezifischen elektrischen Widerstandes dessen Kehrwert, die elektrische Leitfähigkeit, zu betrachten mit $\sigma^* = 1/\rho^*$ (Maßeinheit S/m). Aus Gleichung 6 ergibt sich:

$$\sigma^* = \frac{I}{U^* K} = \frac{1}{ZK} = \frac{Y}{K}, \quad (8)$$

wobei Y die Admittanz (Kehrwert der Impedanz $Y=1/Z$) bzw. den komplexen Leitwert mit der Maßeinheit Siemens (S) darstellt. Der Phasenwinkel der Admittanz beschreibt die Differenz zwischen Strom- und Spannungssignal mit $\varphi_{IU} = \varphi_I - \varphi_U = -\varphi_{UI}$. Daraus folgt, dass die Phasenwinkel von Impedanz und Admittanz vom Betrag her gleich sind, sich aber im Vorzeichen unterscheiden. Unter Berücksichtigung von Gleichung 8, lassen sich der Real- und Imaginärteil der elektrischen Leitfähigkeit aus der Amplitude und Phase der Impedanz berechnen:

$$\sigma' = \frac{1}{|Z|K} \cos(\varphi), \quad (9)$$

$$\sigma'' = \frac{1}{|Z|K} \sin(-\varphi). \quad (10)$$

Der Realteil der Leitfähigkeit σ' entspricht der Ohmschen Komponente, die mit dem Anregungssignal in Phase ist. Der Imaginärteil der Leitfähigkeit σ'' ist ein Maß für die Stärke des kapazitiven Anteils und damit der Polarisation.

Die im Gestein auftretenden Polarisationseffekte bewirken eine Frequenzabhängigkeit der gemessenen Impedanz. Ein Maß für die Stärke der Polarisation ist der Frequenzeffekt FE , der die relative Änderung der Amplitude der Impedanz, die bei zwei unterschiedlichen Frequenzen mit $f_1 < f_2$ gemessen wird, angibt:

$$FE = \frac{|Z(f_1)| - |Z(f_2)|}{|Z(f_2)|}. \quad (11)$$

Aus der Gleichung 11 wird deutlich, dass für den Frequenzeffekt nur die Amplituden der Impedanz benötigt werden. Diese können durch die Amplituden des spezifischen elektrischen Widerstandes ersetzt werden. Eine Phasenmessung ist nicht erforderlich. Der Frequenzeffekt kann daher mit einfachen Widerstandsmessgeräten bestimmt werden, die die Widerstandsamplitude bei wenigstens zwei Frequenzen messen können. Die beiden Messfrequenzen sollten sich dabei wenigstens um einen Faktor 10 unterscheiden.

Die spektrale induzierte Polarisation (SIP) verfolgt das Ziel, in einem möglichst breiten Frequenzbereich das Spektrum des spezifischen elektrischen Widerstandes bzw. der elektrischen Leitfähigkeit zu erfassen. Dabei sind insbesondere bei Feldmessungen zu höheren Frequenzen hin durch die einsetzenden elektromagnetischen Kopplungseffekte Grenzen gesetzt. Die Messung bei sehr kleinen Frequenzen wird durch die notwendigen langen Messzeiten begrenzt. Die Spektren der komplexen elektrischen Leitfähigkeit können mit einer Debye-Zerlegung bearbeitet werden, die eine Relaxationszeitverteilung liefert (Nordsiek & Weller, 2008). Aus der Relaxationszeitverteilung können integrale Parameter bestimmt werden, die das spektrale Verhalten der elektrischen Eigenschaften abbilden. Dazu gehören die Gleichstromleitfähigkeit, die Gesamtaufladbarkeit, eine mittlere Relaxationszeit und ein Ungleichförmigkeitsparameter, der die Breite der Verteilung der Relaxationszeiten beschreibt.

Die Vor- und Nachteile von Zeit- und Frequenzbereichsmessungen werden kontrovers diskutiert. Bei Labormessungen werden überwiegend Frequenzbereichsmessungen angewandt. Bei Feldmessungen sind Zeitbereichsmessungen weit verbreitet. Werden äquivalente Zeit- bzw. Frequenzbereiche hinreichend abgedeckt, sollten aus theoretischer Sicht ganz ähnliche Informationen zum spektralen Verhalten der untersuchten Materialien gewonnen werden. Abweichungen ergeben sich aus dem unterschiedlichen Auflösungsvermögen und der Empfindlichkeit gegenüber Störsignalen bei der eingesetzten Messtechnik.

5. Ergebnisse aus Labormessungen

In den vergangenen drei Jahrzehnten sind an vielen Institutionen IP-Messungen an Festgesteinen und auch an Lockermaterial unter Laborbedingungen durchgeführt worden, um den Einfluss verschiedener Parameter auf das Polarisationsverhalten der Proben zu untersuchen. Mit den Ergebnissen der Labormessungen konnten empirische Beziehungen aufgestellt und die Gültigkeit mechanistischer Modelle überprüft werden. Damit haben die Labormessungen einen wesentlichen Beitrag geleistet, um das Verständnis zu den Ursachen der Polarisierungseffekten zu verbessern. Einige Ergebnisse werden in diesem Kapitel vorgestellt. Die Darstellung beschränkt sich auf Materialien ohne Elektronenleiter (metallische Leiter, Erze, Graphit). Diese Ergebnisse betreffen schwerpunktmäßig SIP-Messungen an Sandsteinen in einem Frequenzbereich zwischen 1 mHz und 100 Hz. Dabei bleiben elektromagnetische Kopplungseffekte oder der Einfluss höherfrequenter Polarisierungseffekte weitgehend unberücksichtigt. In diesem Frequenzbereich kann die elektrische Leitfähigkeit eines porösen Mediums als Parallelschaltung zwischen einer Volumenleitfähigkeit σ_{vol} , die durch die Porenfüllung bestimmt wird, und durch eine komplexwertige Grenzflächenleitfähigkeit σ_{surf}^* , die sich an der elektrischen Doppelschicht (EDL) ausbildet, beschrieben werden:

$$\sigma^* = \sigma_{vol} + \sigma_{surf}^* . \quad (11)$$

Die Volumenleitfähigkeit eines vollgesättigten Gesteins ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der elektrolytischen Leitfähigkeit des Porenfluids σ_w und dem Formationsfaktor F

$$\sigma_{vol} = \frac{\sigma_w}{F} . \quad (12)$$

Der Zusammenhang zwischen Porosität ϕ und Formationsfaktor wird durch das Archie-Gesetz beschrieben (Archie, 1942):

$$F = \frac{1}{\phi^c} , \quad (13)$$

wobei c den sogenannten Zementationsexponenten darstellt. Die Volumenleitfähigkeit besteht im betrachteten Frequenzbereich nur aus einem Realteil, während die Grenzflächenleitfähigkeit sowohl aus Real- und Imaginärteil besteht. Wird die komplexe Leitfähigkeit in Gleichung 11 in Real- und Imaginärteil zerlegt, so ergeben sich die folgenden Formulierungen:

$$\sigma' = \frac{\sigma_w}{F} + \sigma'_{surf} , \quad (14)$$

$$\sigma'' = \sigma''_{surf} . \quad (15)$$

Damit wird deutlich, dass die alleinige Ursache für den im SIP-Experiment bestimmten Imaginärteil der Leitfähigkeit an der Grenzfläche zwischen festen Gesteinsbestandteilen und dem Porenfluid, zu suchen ist. Das elektrische Verhalten an dieser Grenzfläche wird durch die EDL bestimmt und kann mit SIP untersucht werden. Das elektrische Verhalten der EDL wird von einer Vielzahl von Parametern bestimmt. Dazu gehören neben den Eigenschaften der Mineraloberflächen, die u.a. durch das Zetapotenzial und die Kationenaustauschkapazität charakterisiert werden, insbesondere Parameter, die den Chemismus des Porenfluids beschreiben. So beeinflussen die Fluidsättigung, die Art und Konzentration der Ionen im Fluid sowie die Temperatur und der pH-Wert die elektrischen Eigenschaften der EDL (z.B. Bairlein et al., 2016; Skold et al., 2011; Weller & Slater, 2012; Zhang et al. 2019).

Es kann angenommen werden, dass auch die Geometrie der Grenzfläche einen Einfluss hat. Börner & Schön (1993) haben an einem Satz von 19 Sandsteinproben festgestellt, dass ein deutlicher Zusammenhang zwischen der spezifischen inneren Oberfläche (S_{tot} : Normierung der Oberfläche auf das Gesteinsvolumen) und der Größe des Imaginärteils der Leitfähigkeit

besteht. Für ihre Experimente wurden alle Proben mit dem gleichen Porenfluid (NaCl-Lösung mit $\sigma_w = 0,1$ S/m) gesättigt und bei konstanter Temperatur (298 K) gemessen. Die Auswertung betrachtet σ'' bei der Frequenz von 1 Hz. Weitere Studien mit größeren Probensätzen und ähnlichen Messbedingungen haben den Zusammenhang zwischen innerer Oberfläche und σ'' bestätigt. Weller et al. (2010) zeigen für einen aus 114 Proben bestehenden Datensatz einen linearen Zusammenhang zwischen σ'' und der auf das Porenvolumen normierten inneren Oberfläche S_{por} . Verschiedene theoretische Modelle (z.B. Rink & Schopper, 1974; Revil & Florsch, 2010; Niu et al., 2016) lassen einen Zusammenhang

$$\sigma'' \propto \frac{S_{por}}{F}$$

erwarten. Die experimentellen Ergebnisse bestätigen die dominante Rolle der Porengeometrie und insbesondere den Einfluss der inneren Oberfläche auf die Polarisierung. Mit weiteren Experimenten wurde der Einfluss von Zusammensetzung und Konzentration des Porenfluids untersucht. Für den Realteil der Gesteinsleitfähigkeit gilt der in Gleichung 14 formulierte lineare Zusammenhang mit der Fluidleitfähigkeit σ_w . Die Experimente an Sandsteinproben und Lockermaterial zeigen eine weniger ausgeprägte Abhängigkeit der Polarisierung σ'' von σ_w , die im Bereich geringer Salzkonzentrationen durch ein Potenzgesetz mit einem Exponenten meist kleiner als 0,5 beschrieben werden kann (Weller & Slater, 2012). Bei einem Anstieg der Salzkonzentrationen erreicht σ'' zunächst einen Maximalwert, dem bei einem weiteren Anstieg von σ_w eine deutliche Abnahme in σ'' folgt. Zur mathematischen Beschreibung der Funktion $\sigma''(\sigma_w)$ wird folgende Gleichung vorgeschlagen (Weller et al., 2015b):

$$\sigma''(\sigma_w) = c_e + \left(a_e \frac{\sigma_w}{b_e + \sigma_w} \right) \exp(-\sigma_w / d_e), \quad (16)$$

wobei die Parameter a_e , b_e und c_e stark von der Kationenaustauschkapazität der Proben abhängen. Lediglich der Parameter d_e erweist sich als probenunabhängig. Die Experimente zeigen, dass die Annahme einer weitgehenden Unabhängigkeit des Imaginärteils σ'' von der Leitfähigkeit des Porenfluids nur in einem begrenzten Bereich um das Maximum gültig ist. Die Experimente mit verschiedenen Lösungen haben gezeigt, dass auch die Art der gelösten Ionen von Bedeutung ist. Natriumchloridlösungen zeigen beispielsweise um den Faktor 2 höhere Werte von σ'' im Vergleich zu Kalziumchloridlösungen (z.B. Weller et al., 2011). Bei genauer Kenntnis der Abhängigkeiten, können die Werte von σ'' entsprechend auf eine Einheitslösung (z.B. NaCl, $\sigma_w = 0,1$ S/m) korrigiert werden.

Betrachtet man die Gleichung 14, wird deutlich, dass der Realteil der Gesteinsleitfähigkeit sowohl von σ_w als auch vom Realteil der Grenzflächenleitfähigkeit σ'_{surf} abhängt. Eine Bestimmung des Formationsfaktors F ist nur möglich, wenn σ'_{surf} bekannt ist oder als vernachlässigbar gilt ($\sigma'_{surf} \ll \sigma_w / F$). Unter Verwendung von experimentellen Daten von 63 Proben wurde ein linearer Zusammenhang zwischen σ'' und σ'_{surf} gefunden mit einem Verhältnis $l = \sigma'' / \sigma'_{surf} = 0,042$ und einer Standardabweichung von l von 0,022 (Weller et al., 2013). Unter Berücksichtigung dieser Beziehung kann der Formationsfaktor F aus Real- und Imaginärteil der Gesteinsleitfähigkeit und bei Kenntnis der Fluidleitfähigkeit bestimmt werden (Börner et al., 1996):

$$F = \frac{\sigma_w}{\sigma' - (\sigma'' / l)}. \quad (17)$$

Für den Fall, dass der Formationsfaktor bekannt ist, ist die Kenntnis von l hilfreich, um die Fluidleitfähigkeit zu bestimmen.

Die in diesem Kapitel genannten Beispiele sollen verdeutlichen, dass IP-Messungen, die in ihrer praktischen Durchführung einen deutlich höheren Aufwand als Widerstandsmessungen erfordern, wichtige Informationen für eine petrophysikalische Interpretation liefern. Der Imaginärteil der Leitfähigkeit steht in Beziehung zur inneren Oberfläche und damit zu Parametern wie Tongehalt, Kationenaustauschkapazität oder Porengröße, mit deren Hilfe sich die Lithologie des Gesteins charakterisieren lässt.

Die Porengröße und die Porosität sind die entscheidenden Parameter, die die Permeabilität eines Gesteins beeinflussen. Die Porosität kann über den Formationsfaktor aus dem Realteil der Leitfähigkeit bestimmt werden. Die Information zur Porengröße steckt im Imaginärteil. Daher liegt es nahe zu versuchen, mithilfe von IP-Messungen, die Permeabilität abzuschätzen. Börner et al. (1996) entwickelten auf der Grundlage der PaRiS-Gleichung (Pape et al., 1987) einen ersten Algorithmus zur Abschätzung der Permeabilität unter Verwendung von Real- und Imaginärteil der elektrischen Leitfähigkeit. Auf der Grundlage von mechanistischen Modellen und empirischen Beziehungen wird weiter daran gearbeitet, die Algorithmen zur Permeabilitätsbestimmung zu vergleichen und zu verbessern (z.B. Weller et al., 2015a; Robinson et al., 2018).

Die Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen bilden die Grundlage für die Interpretation von Feld- und Bohrlochmessungen. Die Entwicklungen der letzten Jahre belegen eindrucksvoll das Potenzial der IP als ein nützliches geophysikalisches Erkundungsverfahren für vielfältige Anwendungen. Die Erfolge sind Ansporn, mit weiteren Forschungsprojekten die vielen noch offenen Fragen zu den Ursachen und Anwendungsmöglichkeiten der IP anzugehen.

Literatur

- Archie, G.E. (1942) The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of American Institute of Mineralogists Metallurgists and Petroleum Engineers 146, 54-62.
- Atekwana, E.A. & Slater, L.D. (2009) Biogeophysics: a new frontier in Earth science research. Review of Geophysics 47, RG4004.
- Bairlein, K., Bucker, M., Hördt, A. & Hinze, B. (2016) Temperature dependence of spectral induced polarization data: experimental results and membrane polarization theory. Geophysical Journal International 205, 440-453.
- Bleil, D.F. (1953) Induced polarization: A method of geophysical prospecting. Geophysics 18, 636-661.
- Börner, F., Gruhne, M. & Schön, J. (1993) Contamination indications derived from electrical properties in the low-frequency range. Geophysical Prospecting 41, 83-98.
- Börner, F.D. & Schön, J.H. (1993) A relation between the quadrature component of electrical conductivity and the specific surface area of sedimentary rocks. The Log Analyst 32, 612-613.
- Börner, F.D., Schopper, J.R. & Weller, A. (1996) Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements: Geophysical Prospecting 44, 583-601.
- Bucker, M. & Hördt, A. (2013) Analytical modelling of membrane polarization with explicit parametrization of pore radii and the electrical double layer. Geophysical Journal International 194, 804-813.
- Collet, L.S. (1990) History of the induced-polarization method. In Fink, J. B. et al. (Editors) Induced polarization: Applications and case histories. Investigations in geophysics, no. 4, 5-21.

- Comas, X. & Slater, L. (2004) Low-frequency electrical properties of peat. *Water Resources Research* 40, W12414.
- Gurin, G., Titov, K., Ilyin, Yu., & Tarasov, A., 2015, Induced polarization of disseminated electronically conductive minerals: a semi-empirical model, *Geophysical Journal International* 200, 1555 – 1565.
- Marshall, D.J. & Madden, T.R. (1959) Induced polarization, a study of its causes. *Geophysics* 24, 790-816.
- Martin, T. (2012) Complex resistivity measurements on oak. *European Journal of Wood and Wood Products* 70, 45-53.
- Misra, S., Torres-Verdín, C., Revil, A., Rasmus, J. & Homan, D., 2016, Interfacial polarization of disseminated conductive minerals in absence of redox-active species — Part 1: Mechanistic model and validation, *Geophysics* 81, E139–E157.
- Niu, Q., Prasad, M., Revil, A., & Saidian, M. (2016) Textural control on the quadrature conductivity of porous media. *Geophysics* 81(5), E297–E309.
- Nordsiek, S. & Weller, A. (2008) A new approach to fitting induced-polarization spectra. *Geophysics* 73(6), F235 – F245.
- Olhoeft, G.R. (1985) Low-frequency electrical properties. *Geophysics* 50, 2492-2503.
- Pape, H., Riepe, L. Schopper, J.R. (1987) Theory of self-similar network structures in sedimentary and igneous rocks and their investigation with microscopical methods: *Journal of Microscopy*, 148, 121–147.
- Pelton, W.H., Ward, S.H., Hallof, P.G., Sill, W.R. & Nelson, P.H. (1978) Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics* 43, 588–609.
- Revil, A. & Florsch, N. (2010) Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media. *Geophysical Journal International* 181, 1480-1498.
- Revil, A., Florsch, N., & Mao, D., (2015) Induced polarization response of porous media with metallic particles — Part 1: A theory for disseminated semiconductors, *Geophysics* 80, D525–D538.
- Rink, M., & Schopper, J. R. (1974) Interface conductivity and its implications to electric logging. In *SPWLA 15th Annual Logging Symposium*.
- Robinson, J., Slater, L., Weller, A., Keating, K., Robinson, T., Rose, C. & Parker, B. (2018) On permeability prediction from complex conductivity measurements using polarization magnitude and relaxation time. *Water Resources Research* 54. <https://doi.org/10.1002/2017WR022034>.
- Schlumberger, C. (1920) *Étude sur la prospection électrique du sous-sol*. Gauthier-Villars, Paris.
- Skold, M., Revil, A. & Vaudelet, P. (2011) The pH dependence of spectral induced polarization of silica sands: experiment and modeling. *Geophysical Research Letters* 38, L12304.
- Sumner, J.S. (1976) *Principles of induced polarization for geophysical exploration*. Elsevier, Amsterdam.
- Vanhala, H., Soininen, H. & Kukkonen, I. (1992) Detecting organic chemical contaminants by spectral-induced polarization in glacial till environment. *Geophysics* 57, 1014-1017.
- Vinegar, H. J. & Waxman, M. H. (1984) Induced polarization of shaly sands. *Geophysics* 49, 1267-1287.

- Wait, J.R. (1959) Overvoltage Research and geophysical applications. Pergamon Press, London.
- Weller, A., Breede, K., Slater, L. & Nordsiek, S. (2011) Effect of changing water salinity on complex conductivity spectra. *Geophysics* 76(6), F315-F327.
- Weller, A. & Slater, L. (2012) Salinity dependence of complex conductivity of unconsolidated and consolidated materials: Comparisons with electrical double layer models: *Geophysics* 77(5), D185–D198.
- Weller, A., Slater, L., Binley, A., Nordsiek, S. & Xu, S. (2015a) Permeability prediction based on induced polarization: Insights from measurements on sandstone and unconsolidated samples spanning a wide permeability range. *Geophysics* 80 (2), D161-D173.
- Weller, A., Slater, L. & Nordsiek, S. (2013) On the relationship between induced polarization and surface conductivity: Implications for petrophysical interpretation of electrical measurements. *Geophysics* 78(5), D315-D325.
- Weller, A., Slater, L., Nordsiek, S. & Ntarlagiannis, D. (2010). On the estimation of specific surface per unit pore volume from induced polarization: A robust empirical relation fits multiple data sets. *Geophysics* 75(4), WA105-WA112.
- Weller, A., Zhang, Z. & Slater, L. (2015b) High-salinity polarization of sandstones. *Geophysics* 80(3), D309-D318.
- Zhang, Z., Weller, A., Kruschwitz, S. & Nordsiek, S. (2019) Effect of evaporative drying on complex conductivity spectra of sandstones. *Geophysics* 84(1), MR61-MR72.

Spektrale Induzierte Polarisation reaktiver Systeme unter Reservoirbedingungen

Jana H. Börner

Institut für Geophysik und Geoinformatik
Technische Universität Bergakademie Freiberg

Volker Herdegen

Institut für Thermische, Umwelt- und Naturstoffverfahrenstechnik
Technische Universität Bergakademie Freiberg

Juliane Kummerow

Siegfried Raab

Erik Spangenberg

Geothermische Energiesysteme
Geoforschungszentrum Potsdam

Zusammenfassung

Die Komplexität der elektrischen Eigenschaften reaktive Mehrphasensysteme unter Reservoirbedingungen (d.h. bei erhöhten Drücken und Temperaturen) ist dadurch bedingt, dass die einzelnen Phasen (Mineralmatrix, Porenfüllungen) bei Kontakt sowohl physikalisch als auch chemisch miteinander wechselwirken. Es ist dann nicht ohne weiteres möglich, von den Eigenschaften der einzelnen Phasen auf die Eigenschaften des Gesamtsystems zu schließen. Anhand ausgewählter Laboruntersuchungen, die durch Anwendungen aus der unterirdischen CO₂-Speicherung und der tiefen Geothermie motiviert sind wird aufgezeigt, inwieweit SIP-Messungen helfen solche Systeme zu verstehen und welche experimentellen Herausforderungen bei der SIP an reaktiven Systemen unter Reservoirbedingungen auftreten. Es wird gezeigt, dass unter Verwendung spezieller Materialien und Hochdruckanlagen die SIP von Gesteinen bei hohen Drücken und Temperaturen gemessen werden kann, und so Aussagen über die reaktiven Oberflächen der Gesteine und die ablaufenden reaktiven Prozesse getroffen werden können. Daten, Prozessverständnis und Modelle für reaktive Systeme unter Reservoirbedingungen helfen dabei der Entwicklung nicht-invasiver Monitoringverfahren.

1 Einleitung

Gesteine sind hochgradig heterogene Mehrphasensysteme, bestehend aus fester Mineralmatrix und Porenraum, der mit flüssigen und/oder gasförmigen Phasen gefüllt ist. Die Heterogenität der Gesteine rührt dabei nicht nur von Anwesenheit und Volumenanteilen der verschiedenen Phasen her, sondern auch von deren Verteilung, Geometrie und physikalischen Wechselwirkungen an den Phasengrenzflächen. Im Fall von reaktiven Mehrphasensystemen wird die Komplexität zusätzlich dadurch erhöht, dass die einzelnen Phasen bei Kontakt nicht nur physikalisch sondern auch chemisch miteinander wechselwirken, sodass es nicht ohne weiteres möglich ist, von den Eigenschaften der einzelnen Phasen auf die Eigenschaften des Gesamtsystems zu schließen.

Diese physiko-chemischen Reaktionen und Wechselwirkungen hängen von den eng an die Lagerungstiefe gebundenen Reservoirbedingungen Druck und Temperatur ab, die wiederum z.B. den Aggregatzustand von Gasen, Lösungsgleichgewichte oder Dissoziationsgrad

beeinflussen. Insbesondere die elektrischen Gesteinseigenschaften werden dabei neben Anteil, Beschaffenheit und Verteilung elektrisch leitfähiger Phasen durch physikalische Wechselwirkungen und chemische Reaktionen bestimmt.

Reaktive Systeme in Verbindung mit erhöhten Drücken und Temperaturen, die vorteilhaft mit elektrischen Verfahren gemonitort werden können, treten im geowissenschaftlichen Kontext sowohl natürlich als auch durch anthropogenen Eingriff auf. Natürliche Beispiele sind Gasauftiege (z.B. CO₂-Austritte an Mofetten oder entlang von Störungszonen; Flechsig et al. 2010 bzw. Börner et al. 2018) oder die Zirkulation geothermaler Wässer (z.B. Kummerow et al. 2018). Durch menschlichen Eingriff entstandene Systeme finden sich zum Beispiel bei der unterirdischen CO₂-Speicherung (z.B. Börner et al. 2013), bei der tertiären Erdölförderung (enhanced oil recovery EOR; z.B. Emberly et al. 2004, Tietze et al. 2014) oder bei der tiefen Geothermie (z.B. Peacock et al., 2013; Didana et al. 2017).

Die Methode der Spektralen Induzierten Polarisation (SIP) bietet vor diesem Hintergrund als einziges geophysikalisches Verfahren die Möglichkeit, ein solches System umfassend elektrisch zu charakterisieren, petrophysikalische Mehrdeutigkeiten zu reduzieren und somit ablaufende Prozesse zu monitoren. Die Entwicklung petrophysikalischer Modelle ist dabei für Planung und Auswertung eines elektrischen Monitorings reaktiver Systeme unerlässlich und trägt maßgeblich zum Prozessverständnis bei.

Im Folgenden soll anhand ausgewählter Laboruntersuchungen, die durch Anwendungen aus der unterirdischen CO₂-Speicherung und der tiefen Geothermie motiviert sind, aufgezeigt werden inwieweit SIP-Messungen helfen reaktive Systeme zu verstehen und welche experimentellen Herausforderungen bei der SIP an reaktiven Systemen unter Reservoirbedingungen auftreten. Um ein umfassendes Prozessverständnis und damit petrophysikalische Modelle für belastbare Prognosen zu entwickeln, ist es erforderlich, systematische Untersuchungen von Teilsystemen durchzuführen.

2 Reaktive Mehrphasensysteme unter Reservoirbedingungen

Der Einfluss von Gesteinsparametern, wie z.B. Porenwasserleitfähigkeit, Phasensättigung, Porosität, spezifische Oberfläche, Oberflächenladungsdichte auf die SIP unter Normalbedingungen wurde in den letzten Jahren intensiv untersucht und ist schon recht gut bekannt (siehe Beitrag von A. Weller in diesem Kolloquiumsband). Gegenstand und Herausforderung der hier vorgestellten Untersuchungen sind, dass die Einflussparameter selbst von den Druck/Temperaturbedingungen und den sehr komplexen chemisch-physikalischen Wechselwirkungen im System abhängen. Für das Verständnis der SIP von reaktiven Mehrphasensystemen unter Reservoirbedingungen ist es daher erforderlich, die Druck- und Temperaturabhängigkeit der elektrischen Eigenschaften der Phasen und die der Wechselwirkungs- und Umwandlungsprozesse zu analysieren.

Schematisch ist ein solches Netzwerk von elektrisch wirksamen physikalisch-chemischen Wechselwirkungen in Abb. 1 für ein Dreiphasensystem mit reaktivem Gas (CO₂) und reaktiver Mineralmatrix (Karbonat) dargestellt. Bereits eine geringfügige Änderung der Druck/Temperatur-Bedingungen zieht eine vielfache Reaktion des Systems nach sich: Die Dichte des CO₂ und damit die Sättigung ändert sich, Löslichkeit und Dissoziationsgrad des CO₂ ändern sich, sodass sich die ionische Zusammensetzung und der pH-Wert des Porenwassers ändern. Nachfolgend reagiert die karbonatische Matrix mit Lösung oder Fällung, was wiederum auf die Zusammensetzung des Porenwassers sowie auf Größe und Chemismus der inneren Oberfläche und die Porenraumgeometrie zurückwirkt. Abschließend ändert sich wiederum die CO₂-Löslichkeit bei veränderter Porenwasserzusammensetzung. Es ist somit nicht mehr ohne weiteres möglich die SIP-Antwort im neuen Gleichgewicht zu prognostizieren.

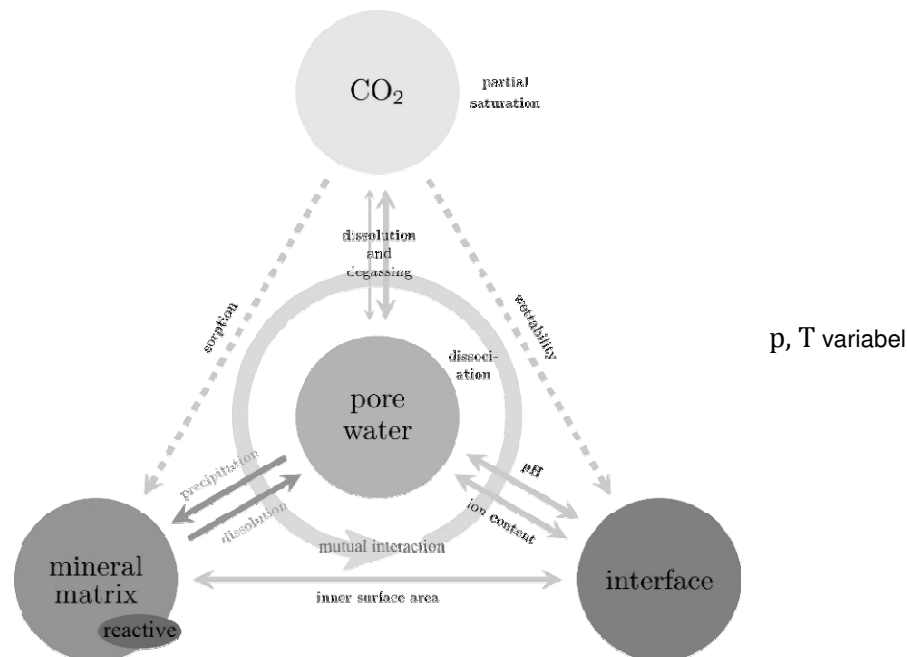


Abb. 1: Schematische Darstellung der Phasen und Prozesse, die auf die elektrischen Gesteinseigenschaften eines reaktiven Systems wirken, dargestellt am Beispiel des Systems Gestein-Porenwasser-CO₂ (aus Börner et al., 2017a).

Ein grundsätzlicher Ansatz für ein petrophysikalisches Modell eines solchen Systems lautet (basierend auf Modellen für Normalbedingungen, siehe Formeln 11-15 im Beitrag von A. Weller in diesem Kolloquiumsband; Schön, 2015) nach Börner et al. (2017):

$$\sigma' = \frac{1}{F} S_w^n \sigma_w^{\text{norm}} + S_w^k X \sigma_{\text{surf}}^{\text{norm}} \sigma'_{\text{surf}, S_w=1} \quad (1)$$

$$\sigma'' = S_w^k X \sigma_{\text{surf}}^{\text{norm}} \sigma''_{\text{surf}, S_w=1} \quad (2)$$

Hierbei wird eine übliche Beschreibung der komplexen Leitfähigkeit ($\sigma^* = \sigma' + i\sigma''$) mittels Formationsfaktor (F), Porenwasserleitfähigkeit (σ_w), Sättigung (S_w), Sättigungsexponenten (n bzw. k) und den Komponenten der Grenzflächenleitfähigkeit bei Vollsättigung und Normalbedingungen ($\sigma'_{\text{surf}, S_w=1}$ und $\sigma''_{\text{surf}, S_w=1}$) durch die dimensionslosen Faktoren σ_w^{norm} , $\sigma_{\text{surf}}^{\text{norm}}$ und X erweitert. Diese sind Funktionen von Druck, Temperatur und Zusammensetzung des Porenwassers und beschreiben die Wirkung dieser Parameter und der daraus folgenden Wechselwirkungen auf die Porenwasserleitfähigkeit (σ_w^{norm}), die Oberflächenladungsdichte ($\sigma_{\text{surf}}^{\text{norm}}$) und die Größe der inneren Oberfläche (X). Laborexperimente können aufbauend auf einer derartigen Modellvorstellung so gestaltet werden, dass die Wechselwirkungsfaktoren quantifiziert werden können.

Aufgrund ihres besonders häufigen Vorkommens und der im Erdinneren vorliegenden Druck- und Temperaturbedingungen kommt den physikalischen Eigenschaften von salinarem Porenwasser und CO₂ eine besondere Bedeutung zu. Sie erfahren bei typisch auftretenden p/T-Bedingungen Aggregatzustandsänderungen (siehe Abb. 2). Dabei geht das CO₂ bei einem geothermischen Gradienten von 3°C/100m Tiefe und hydrostatischen Druckbedingungen im Porenraum mit zunehmender Tiefe zunächst vom gasförmigen in den flüssigen und dann in den überkritischen Zustand über. In letzterem weist das CO₂ – im Gegensatz zu seinen anderen Aggregatzuständen – massiv veränderte Eigenschaften auf: Es ist korrodierend, sorbiert in viele Stoffe und wirkt als Lösungsmittel.

Phasenübergänge des Wassers von der elektrisch leitenden Flüssigkeit zum nicht-leitenden Gas bis hin zum überkritischen Fluid, das wieder leitfähig wird und starke Lösungsmiteigenschaften ausbildet, können die elektrischen Eigenschaften massiv beeinflussen.

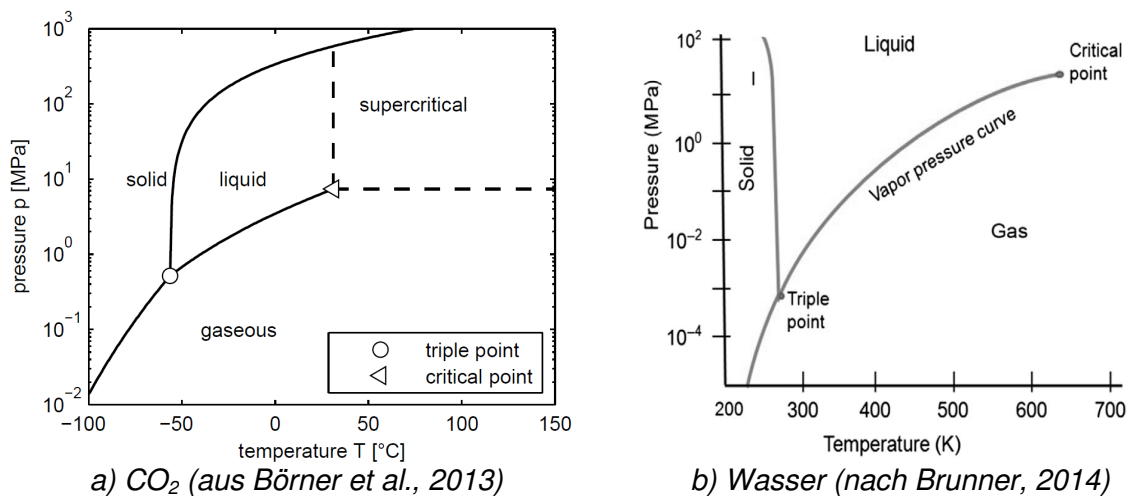


Abb. 2: Phasendiagramme von CO₂ und Wasser.

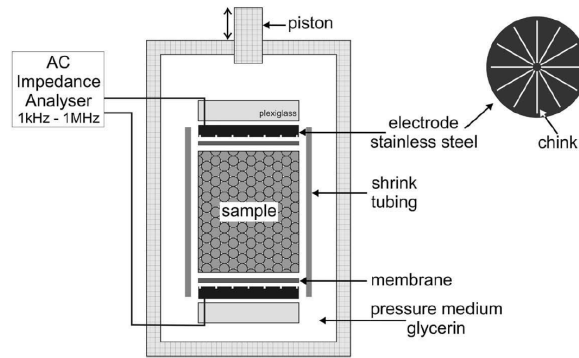
3 Messung der SIP bei erhöhten Drücken und Temperaturen

Die qualitativ hochwertige Messung der SIP bei Reservoirbedingungen und unter Einfluss hochreaktiver Fluide wie überkritischem CO₂ oder Wasser muss folgenden, schwer in Übereinstimmung zu bringenden Anforderungen genügen:

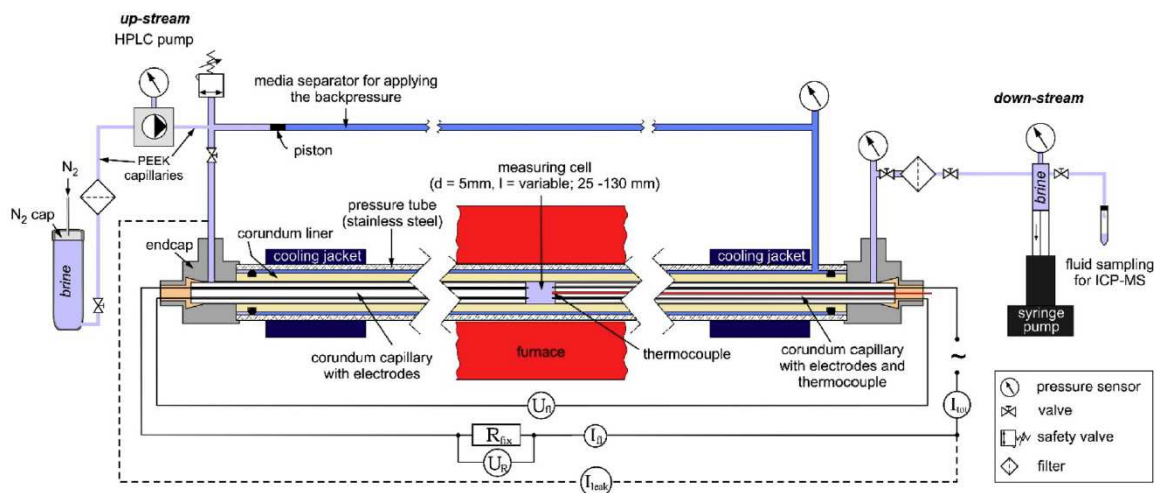
1. Die Reservoirbedingungen müssen stabil, genau und vor allem sicher im Labor nachgebildet werden. Außerdem müssen die notwendigen Fluide dem System zugeführt und etwaige Produkte abgeführt werden. Dazu sind Hochdruck-/Hochtemperatur-Autoklaven mit Zu- und Ableitungen sowie Pumpen notwendig, die aus Stahl gefertigt sind. Die Autoklaven bieten begrenzten Raum, in dem die Probe sowie sämtliche Sensoren und Elektroden untergebracht werden müssen. Eine visuelle Prüfung des Proben- bzw. Messzellenzustandes ist nach dem Schließen des Autoklaven meist nicht mehr möglich.
2. Die SIP-Messung muss – wie auch unter Normalbedingungen – in einer elektrisch nicht-leitenden Messzelle mit hochwertigen Elektroden erfolgen. Elektrischer Kontakt mit dem Autoklaven muss also vermieden werden. Die meisten Kunststoffe, die üblicherweise für den Bau von SIP-Messzellen verwendet werden (z.B. PMMA, PTFE, ...) sowie klassische nicht-polarisierbare Elektroden sind bei sehr hohen Temperaturen und überkritischen Bedingungen nicht einsetzbar, da Sorption, Lösung, Migration und Korrosion diese Materialien und Komponenten innerhalb kurzer Zeit zerstören.

In Abb. 3 sind drei Anlagen skizziert, die diese Anforderungen für verschiedene Anwendungen und Schwerpunkte sehr unterschiedlich technisch lösen (vergl. auch Lockner & Byerlee, 1985). Die Anlagen unterscheiden sich hinsichtlich der Anzahl der Phasen (Abb. 3a,b für zwei Phasen, 3c für drei Phasen), des p/T -Bereiches (3a bis 1000 bar und Raumtemperatur, 3b bis 320 bar und 425°C, 3c bis 400 bar und 80°C), des Drucktypes (3a effektiver Druck; 3b,c hydrostatischer Druck), Elektrodenmaterial und -anordnung (3a: 2-Punkt-Anordnung und Edelstahl, 3b,c: 4-Punkt-Anordnung und Platin) und Probengröße (3a,c: etwa 3cm \varnothing , 3b: 5mm \varnothing). Die in Abb. 3a beschriebene Anlage erlaubt die

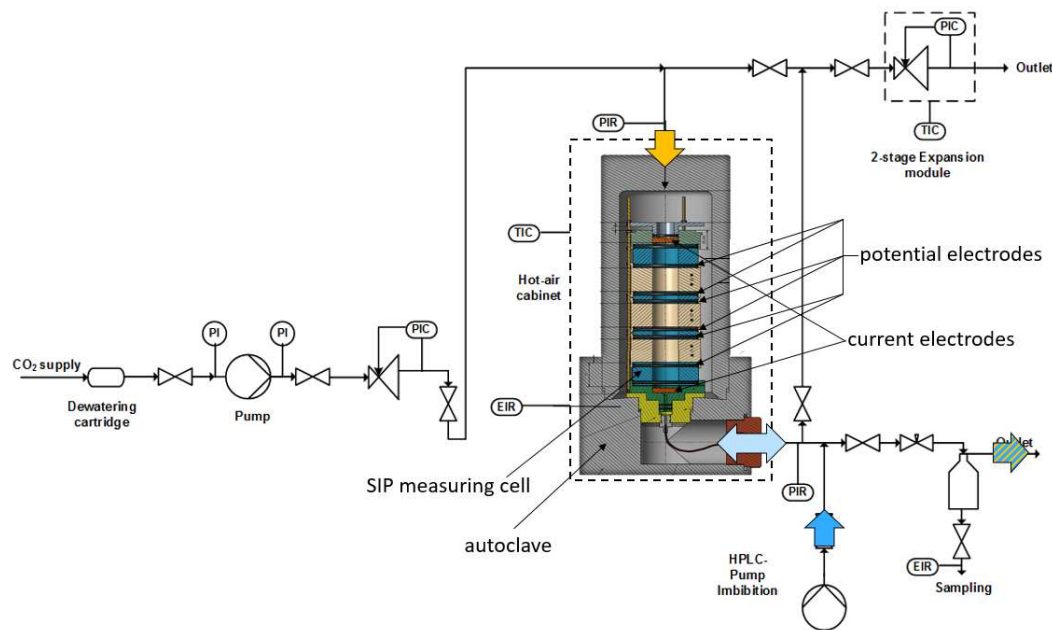
Untersuchung von wassergesättigten Proben bei variierendem effektiven Druck (Zisser et al. 2009). Kummerow et al. (2018) legen den Fokus auf gesättigte Proben mit nahe- und überkritischen Wässern (Abb. 3b). Das Setup von Börner et al. (2017b, Abb. 3c) erlaubt das höhenorientierte Messen an voll- und teilgesättigten Proben unter CO_2 und anderen Gasen (z.B. N_2).



- a) Kolben-Zylinder-Autoklav mit 2-Elektroden-Anordnung zur Messung der SIP an Gesteinsproben bei konstantem Poreninnendruck und variablem Auflastdruck sowie Raumtemperatur (Probendimensionen: 30 mm Durchmesser, 20-35mm Länge; aus Zisser et al., 2009).



- b) Versuchsaufbau mit Edelstahl-Hochdruckrohr und Messzelle mit 4-Punktanordnung zur elektrischen Messung an Fluid- und Gesteinsproben bei Drücken bis 320bar und Temperaturen von 23-425°C (Probendimensionen: 5mm Durchmesser, 26.5-128mm Länge; aus Kummerow et al., 2018).



c) Versuchsaufbau mit Edelstahlautoklav und Messzelle mit 3-kanaliger 4-Punktanordnung zur Messung der SIP an Fluid- und Gesteinsproben unter CO_2 / N_2 (statisch und Durchströmung/ Imbibition) bei hydrostatischem Druck bis 400bar und Temperaturen von 8-80°C (Probendimensionen: 30-50mm Durchmesser, 30-200mm Länge; aus Börner et al., 2017a)

Abb. 3: Versuchsanordnungen zur Messung der SIP unter Reservoirbedingungen.

4 Ergebnisse

Für die Untersuchung reaktiver Mehrphasensysteme und deren Abhängigkeit von Druck und Temperatur ist es unerlässlich die Komplexität der auftretenden Wechselwirkungen zunächst zu reduzieren und Teilsysteme zu betrachten. So liefern z.B. systematische Untersuchungen an Porenwässern Informationen zu σ_w^{norm} . Darauf aufbauend wird dann das vollständige reaktive System untersucht und es ist besser möglich die mehrfachen Wechselwirkungen zu trennen. Diesem Konzept folgend werden im Folgenden exemplarisch Ergebnisse zu Untersuchungen an reaktiven Ein-, Zwei- und schließlich Dreiphasensystemen vorgestellt.

4.1 Einphasensysteme

In Vorbereitung auf Versuche zu Porenwasser-Gestein-Wechselwirkungen bei nahe- bis überkritischen Bedingungen (des Porenwassers) untersuchen Kummerow et al. (2018) zunächst die elektrische Leitfähigkeit gemischter Elektrolyte beim Übergang in den überkritischen Zustand. Diese zeigen im unterkritischen Bereich – ähnlich wie Lösungen einfacher Elektrolyte – eine starke Temperaturabhängigkeit in Form einer linksschiefen Kurve mit einer maximalen Leitfähigkeit bei ca. 275°C (Abb. 4). Bei der kritischen Temperatur bricht die Leitfähigkeit zusammen und verbleibt auch im überkritischen Bereich auf niedrigem Niveau.

Der temperaturabhängige Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit kann durch die Wechselwirkung von Viskosität, Dichte und Permittivität erklärt werden (Quist & Marshall, 1968). Diese Parameter bestimmen wiederum das Gleichgewicht der gelösten ionischen Spezies und damit die Konzentration der freien, leitfähigen Ionen in der Lösung. Bis zu 300°C nimmt die Viskosität von Wasser stark ab, bewirkt eine Zunahme der Ionenbeweglichkeit und damit eine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit. Bei höheren Temperaturen lässt die Viskositätsabnahme nach, während die isobare Dichte weiter sinkt.

Folglich sinkt die Anzahl der Ionen pro Volumeneinheit, was den Effekt der Ionenmobilität ausgleicht und die Fähigkeit zur Wasserdissoziation verringert. Dies führt zu einer beginnenden Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit.

Darüber hinaus werden die Wasserstoffbrückenbindungen mit abnehmender Dichte geschwächt, was sich in einer abnehmenden Permittivität auf bis zu 5 am kritischen Punkt widerspiegelt (Uematsu & Franck, 1980). Dies entspricht einer Verringerung des polaren Charakters des Wassers, was dessen Fähigkeit anorganische Salze zu lösen verringert und zu Salzausfällungen führt. Bei Erreichen des kritischen Punktes wird dieser Effekt verstärkt, da sich die innere Struktur des Wassers durch einen erheblichen Abbau von Wasserstoffbrückenbindungen und die Reorganisation von H₂O-Molekülen signifikant verändert (Galkin & Lunin, 2005).

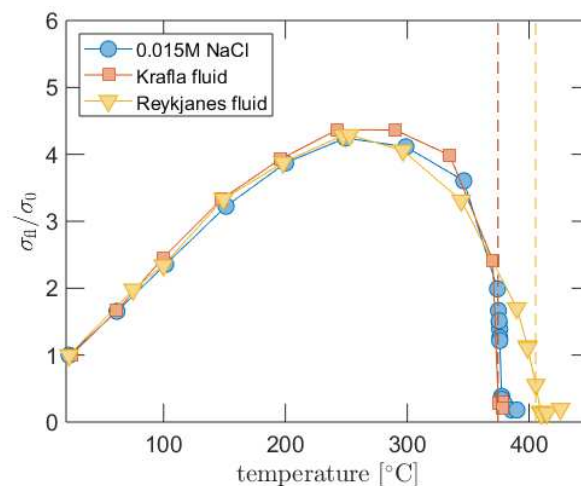


Abb. 4: Relative Temperaturabhängigkeit (im Sinne des Faktors σ_T/σ_0) der Leitfähigkeit gemischter Elektrolyte bei 230 bis 310bar. Die kritische Temperatur T_c beträgt 374.3 bis 405.4°C, je nach Fluidzusammensetzung (Daten aus Kummerow et al., 2018).

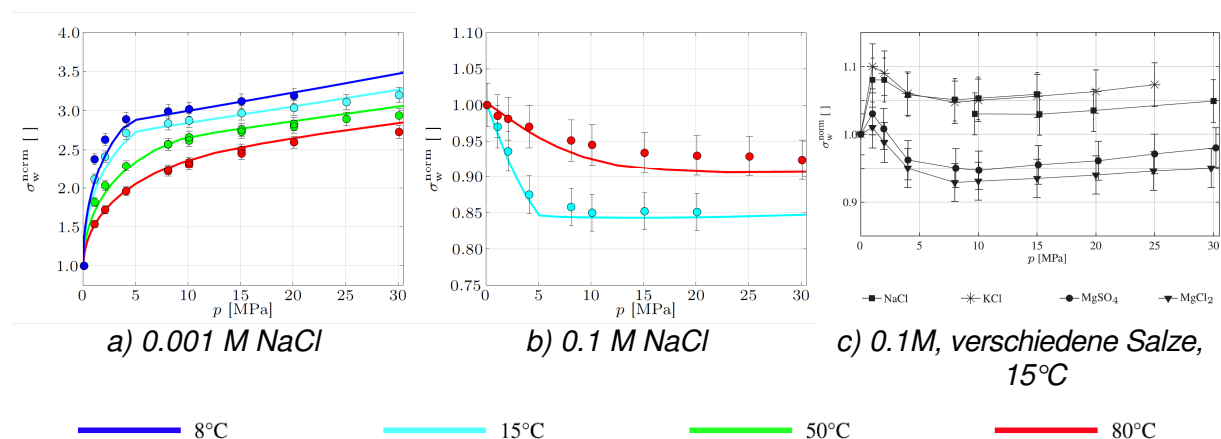


Abb. 5: Relative Druckabhängigkeit der Leitfähigkeit von Salzlösungen im thermodynamischen Gleichgewicht mit CO₂ bei Temperaturen von 8-80°C. Der kritische Punkt des CO₂ liegt bei 30.98°C und 73.77bar, der scharfe Knick bei 50bar resultiert aus dem Phasenübergang von gasförmig zu flüssig. Oberhalb der kritischen Temperatur findet ein gradueller Übergang vom gasförmigen in den überkritischen Zustand statt (aus Börner et al., 2015).

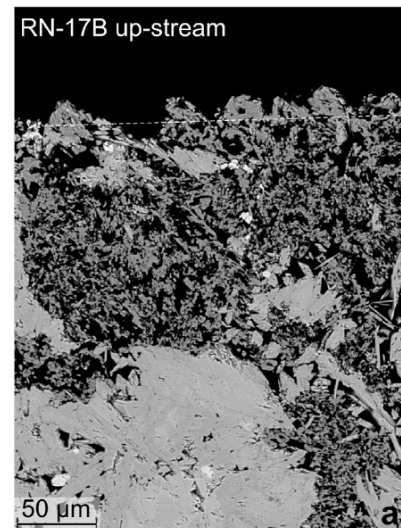
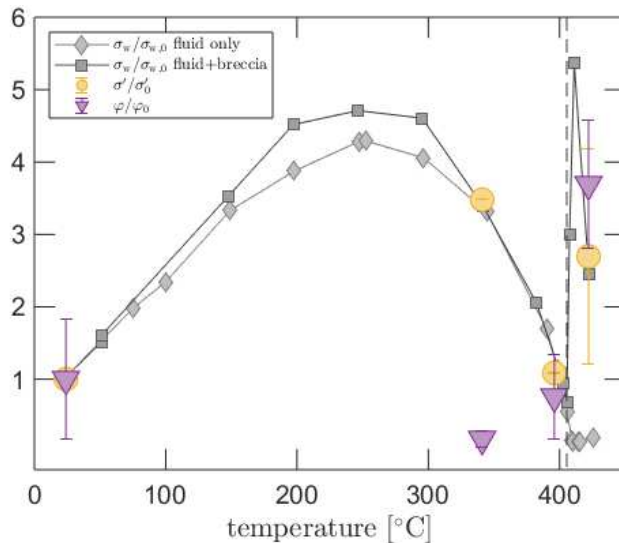
Messungen der Druckabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Salzlösungen im Bereich linearer Temperaturabhängigkeit (<100°C) und unter Einfluss von CO₂ in gasförmigem, flüssigem und überkritischen Zustand bilden die Basis für die Untersuchung der SIP an wasserhaltigen Gesteinen unter CO₂ –Einwirkung (vergl. Abb. 1). Dafür wurden Wasserproben bekannter Salinität einer CO₂-Atmosphäre bei konstantem Druck und konstanter Temperatur ausgesetzt, bis sich das thermodynamische Gleichgewicht einstellt (Börner et al., 2015).

Bei geringer Salinität der Ausgangslösung steigt die Leitfähigkeit der Lösung durch die Beaufschlagung mit CO₂ („low-salinity regime“, Abb. 5a). Dies ist der erwartete Effekt, da die infolge der Einlösung von CO₂ in Wasser gebildete Kohlensäure dissoziiert und der Lösung somit zusätzliche Ladungsträger zugeführt werden. Bei höheren Salinitäten zeigt sich jedoch ein gegenläufiger Effekt: Statt der erwarteten Leitfähigkeitserhöhung beobachtet man eine Leitfähigkeitsverringerung um bis zu 15% („high-salinity regime“, Abb. 5a). Die Erklärung für dieses Phänomen ist, dass in Abhängigkeit von der Salinität entweder der zusätzliche Leitfähigkeitsbeitrag aus der Dissoziation der Kohlensäure dominiert, oder aber die durch die zusätzlich in Lösung befindlichen CO₂-Spezies verursachte Verringerung der Mobilität der zahlreichen Salzionen die Leitfähigkeit bestimmt. Im einem mittleren Salinitätsbereich zeigt sich das Wechselspiel der entgegengesetzt wirkenden Prozesse (Abb. 5c). Das beschriebene Verhalten zeigt sich qualitativ bei allen untersuchten Salzlösungen und gemischten Elektrolyten.

Die Wirkung der CO₂-Einlösung und -Dissoziation auf die Porenwasserleitfähigkeit kann basierend auf den physikalisch-chemischen Eigenschaften mithilfe des folgenden Modells für alle Salzgehalte vorhergesagt werden (Börner et al., 2015):

$$\sigma_w^{\text{norm}}(p, T, c_{\text{NaCl}}) = \frac{\sigma_w}{\sigma_w^0} = \frac{1}{\sigma_w^0} \sum_{i=1}^2 [\Lambda_i \gamma_i \alpha_i c_i] \quad (3)$$

Hierbei bezeichnet σ_w die Elektrolytleitfähigkeit unter CO₂, σ_w^0 ist die anfängliche Elektrolytleitfähigkeit unter Normalbedingungen. Λ bezeichnet die molare Leitfähigkeit, γ den Aktivitätskoeffizient, α ist der Dissoziationsgrad und c ist die Konzentration. Die Aktivitätskoeffizienten γ_i von NaCl und dissoziiertem CO₂ sind selbst Funktionen und hängen von den Konzentrationen aller Komponenten ab. Eine empirische Formulierung für σ_w^{norm} ist ebenfalls verfügbar.



a) Temperaturabhängigkeit der Reykjanes Fluidleitfähigkeit mit und ohne Gestein sowie des Realteils und der Phase der komplexen Leitfähigkeit ($T_c = 405.4^\circ\text{C}$)

b) EPMA-aufnahme von Lösungserscheinungen an der Brekzienprobe

Abb. 7: Temperaturabhängigkeit von Fluidleitfähigkeit und SIP (gemittelt für 10-1000Hz) einer Reykjanes Brekzienprobe bei 310bar. Elektronenstrahlmikroanalysenaufnahmen (EPMA) verdeutlichen die massive Minerallösung und Oberflächenveränderung durch das überkritische Porenwasser (Daten von J. Kummerow, Kummerow et al. 2018).

4.2 Zweiphasensysteme

Unter hydrostatischem Druck und auf Basis der Untersuchungen an geothermalen Wässern (siehe Abschnitt 4.1) wurden Versuche an einer Brekzie (Reykjanes, SW-Island), die mit dem zugehörigen Porenwasser gesättigt (Abb. 4) war und während des Versuches durchströmt wurde, durchgeführt. Dabei zeigt sich ein bemerkenswert starker Einfluss der Minerauflösung auf die Fluidleitfähigkeit (Abb. 7a).

Die bei der kritischen Temperatur auf unter ihr Anfangsniveau abgesunkene Fluidleitfähigkeit steigt bei überkritischen Bedingungen sehr schnell auf ein Vielfaches. Dieses schnelle Umschlagen von abnehmenden zu steigenden Werten deutet auf eine massive Freisetzung von Ladungsträgern aus den angebotenen Feststoffen hin, die in Kombination mit der erhöhten Mobilität die Wirkung der Salzausfällungen ausgleichen (Bignall et al., 2001; Weingärtner & Franck, 2005; Tsuchiya et al., 2015).

Die SIP der Brekzienprobe zeigt zunächst, dass der Realteil der Leitfähigkeit wesentlich durch das Verhalten des Fluides geprägt ist, er zeigt die gleiche relative Temperaturabhängigkeit. Die Phasenverschiebung, die bei moderaten Temperaturänderungen normalerweise als T-unabhängig betrachtet werden kann, ist bei überkritischen Bedingungen signifikant erhöht, was Ausdruck der Oberflächenveränderungen durch die Minerallösung (Abb. 7b) sowie u.U. der veränderten Organisation des Wassers auf atomarer Ebene bei überkritischen Bedingungen ist.

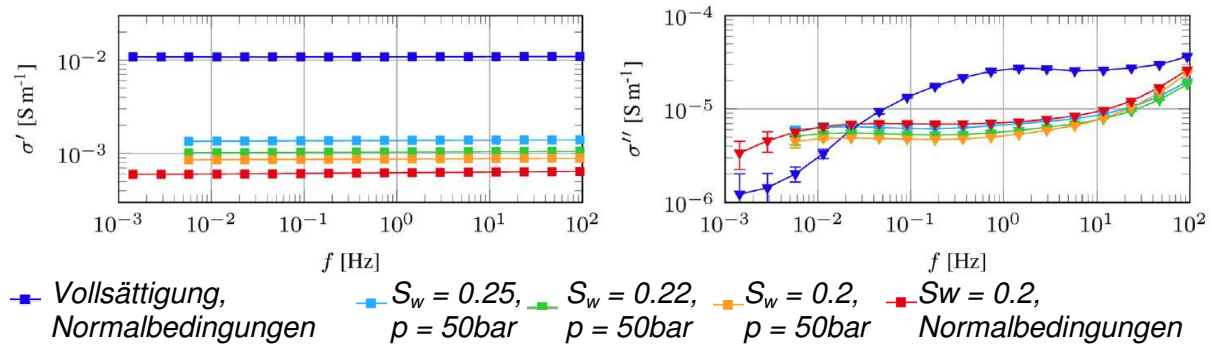


Abb. 8: CO₂ Versuch Sand Durchströmung (aus Börner et al., 2017 GJI).

4.3 Dreiphasensysteme

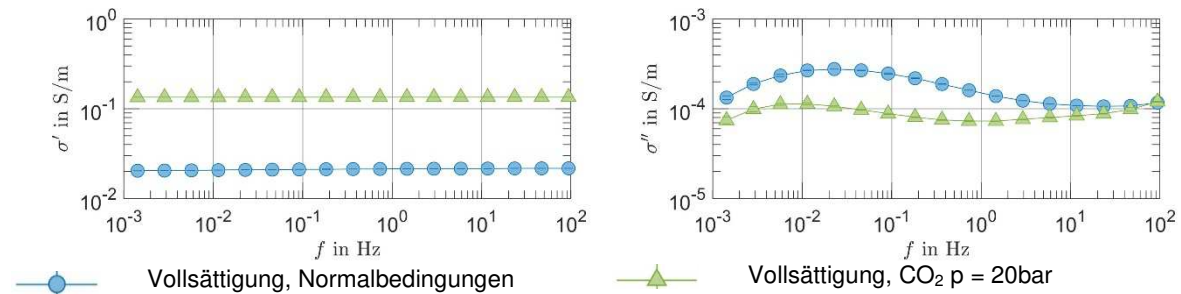
Aufbauend auf den Untersuchungen am Einphasensystem (Abschnitt 4.1) wurden Durchströmungsversuche an Quarzsand durchgeführt (Börner et al., 2017). Dafür wurden initial vollständig wassergesättigte Proben temperiert und mit einer CO₂-Atmosphäre konstanten Drucks beaufschlagt. Bei konstantem Druck- und Temperaturniveau wurde die Probe dann mit CO₂ durchströmt. Während des gesamten Vorganges wurde permanent die SIP-Antwort der Probe gemessen (Abb. 8). Es zeigt sich, dass der Realteil der elektrischen Leitfähigkeit als Überlagerung der Sättigungsänderung infolge der Durchströmung und der Änderung der Porenwasserleitfähigkeit gemäß σ_w^{norm} verstanden werden kann (vergl. Formeln 1 und 3). Wenn Formel 3 in bestehende petrophysikalische Modelle der Sättigungsabhängigkeit integriert wird, ist eine Rekonstruktion der CO₂-Sättigung aus der elektrischen Messung möglich.

Außerdem konnte der Einfluss des CO₂ auf den Imaginärteil der Leitfähigkeit separiert werden (Formel 2). Anders als der Realteil, der von dem wechselnden Löslichkeitsregime bestimmt wird, reagiert der Imaginärteil neben seiner Sättigungsabhängigkeit stets mit einer zusätzlichen Verringerung. Diese kann mit dem niedrigen pH-Wert im sauren Milieu des kohlensäurehaltigen Porenwassers in Verbindung gebracht werden (vergl. Duval et al. 2002, Skold et al. 2011).

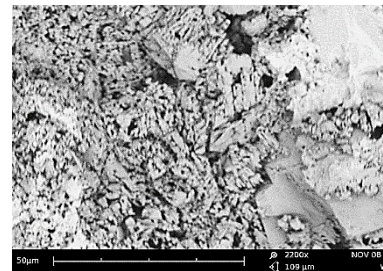
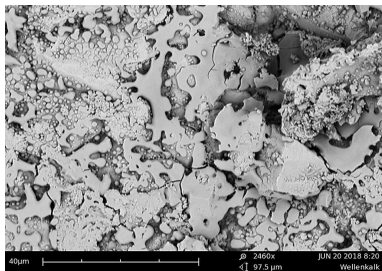
Anschließend an die als Referenz dienenden Untersuchungen an Dreiphasensystemen mit inerter Quarz-Matrix wurden erste Messreihen an karbonatischen Gesteine durchgeführt. Karbonate sind als wichtige Erdöl- und Erdgasreservoire Gesteine Gegenstand von Untersuchungen zu tertiären Ölfördermethoden und der Nutzung für eine CO₂-Speicherung. Die Petrophysik der Karbonate ist durch deren unterschiedliche Genese und differenzierte geologische Geschichte geprägt. Unterschiedliche mineralische Zusammensetzungen und ausgeprägt komplexe Porenraumgeometrien sind die Folge und bedingen eine extreme Heterogenität auf mehreren Ebenen. Die reaktive Natur der Karbonate bedingt außerdem, dass sie auf jede Änderung des Porenhaltendes oder der Druck/Temperaturbedingungen mit Lösung, Fällung und/oder veränderter Oberflächenkomplexierung reagieren (Abb. 9b). Eine Möglichkeit diese natürlichen Heterogenitäten zu mindern und dadurch fokussierte Untersuchungen der physikalisch-chemischen Wechselwirkungen zu ermöglichen, ist die Arbeit mit zerkleinerten Proben (d.h. Schüttungen von Karbonatpartikeln, Cuttings).

Abb. 9a zeigt die SIP von wassergesättigten Karbonatpartikeln (ϕ 0.57mm) unter einer CO₂-Atmosphäre von 20bar und 15°C. Aufgrund der auf die Kohlensäuredissoziation folgenden Karbonatlösung erhöht sich σ_w deutlich über den in Formel 3 beschriebenen Effekt hinaus (vergl. σ_w^i in Abb. 9a). Gleichzeitig sinkt der Imaginärteil σ'' stark. Diesen Effekt beobachtet man qualitativ auch bei Quarz, er ist im Falle des Karbonates aber bemerkenswert, da sich –

anders als bei Quarz – durch die Karbonatlösung die innere Oberfläche der Probe signifikant erhöht (vergl. X in Formel 2; Wigand et al. 2008). Es ist zu vermuten, dass Lösung und Anwesenheit von CO_2 zu einer Änderung der chemischen Struktur der Karbonatoberfläche führen.



a) SIP eines zertrümmerten mikritischen Kalksteins (Partikelgröße 0.57mm)



b) REM-Aufnahmen des gleichen Kalksteins (geschnitten) vor (links) und nach (rechts) CO_2 .

Abb. 9: Statischer Versuch mit wassergesättigtem Karbonatgestein und CO_2 bei 15°C und 20bar (aus Börner et al., 2018b).

5 Schluss

Der vorliegende Beitrag gibt einen exemplarischen Einblick in die zu bewältigenden experimentellen Anforderungen sowie die nachgewiesene und potenzielle Aussagekraft von SIP-Messungen an reaktiven Systemen unter Reservoirbedingungen. Derartige reaktive Mehrphasensystemen zeichnen sich dadurch aus, dass die Phasen untereinander bei einer Zustandsänderung intensiv physikalisch und chemisch wechselwirken, sodass es nicht ohne weiteres möglich ist, von den elektrischen Eigenschaften der einzelnen separaten Phasen auf die Eigenschaften des Gesamtsystems zu schließen. Viele der Wechselwirkungen hängen in komplexer Weise von Druck und Temperatur ab wie zum Beispiel der Aggregatzustand, Lösungsgleichgewichte oder die Dissoziation.

Es wurde gezeigt, dass unter Verwendung spezieller Materialien und Hochdruckanlagen die SIP von Gesteinen bei hohen Drücken und Temperaturen sowie bei der Einwirkung von überkritischem CO_2 oder Wasser gemessen werden kann, und so Aussagen über die reaktiven Oberflächen der Gesteine und die ablaufenden reaktiven Prozesse getroffen werden können. Daten, Prozessverständnis und Modelle für reaktive Systeme unter Reservoirbedingungen helfen dabei der Entwicklung nicht-invasiver Monitoringverfahren für z.B. natürliche Gasauftiege, geothermale Zonen, die unterirdischen CO_2 -Speicherung, die tertiäre Erdölförderung oder die tiefen Geothermie.

Danksagung

Jana Börner dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung (Projekte SP 356/12-1, SP 356/14-1, SP 356/14-2). Juliane Kummerow und Siegfried Raab danken der EU für finanzielle Förderung im Rahmen der Projekte IMAGE und GEMex (Grant agreement no. 608553 und Grant agreement no. 727550), sowie dem International Continental Scientific Drilling Program (ICDP), der US National Science Foundation (NSF) und der HS Orka Power Company/ Island für die Bereitstellung von IDDP-Kernmaterial (Grant No. 05076725). Die Autoren danken weiterhin Georg Nover für die Bereitstellung seiner Arbeiten und anregende Diskussionen.

Referenzen

- Bignall, G., Hirano, N., Yamasaki, N., Tsuchiya, N., Nakatsuka, K., 2001. Experimental approach to understanding water-rock interactions in enhanced geothermal systems. Proceedings 23rd New Zealand Geothermal Workshop 2001, November 7–9. Auckland University, New Zealand, pp. 15–20.
- Börner, J.H., Herdeggen, V., Repke, J.-U. and Spitzer, K., 2017. Spectral induced polarization of the three-phase system CO₂ - brine - sand under reservoir conditions. *Geophysical Journal International*. 208: 289 - 305.
- Börner, J.H., Herdeggen, V., Müller-Huber, E., and Spitzer, K., 2017b. Impact of CO₂ on the Complex Electrical Conductivity of Carbonate Rocks under Reservoir Conditions. International Symposium of the Society of Core Analysts, Vienna, reviewed extended abstract, 9 pages.
- Börner, J. H., Girault, F., Bhattarai, M., Adhikari, L. B., Deldicque, D., Perrier, F., & Spitzer, K., 2018. Anomalous complex electrical conductivity of a graphitic black schist from the Himalayas of central Nepal. *Geophysical Research Letters*, 45, 3984–3993.
- Börner, J.H., Herdeggen, V., Rieger, A., Repke, J.-U., Spitzer, K., 2018b. Electrical Properties of Carbonate Rocks - Insights from Multi-Method Laboratory Investigations. Poster, 24th International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Aug 13 - 20, 2018, Helsingør, Denmark.
- Brunner, G., 2014. Chapter 2 - Properties of Pure Water, In: *Hydrothermal and Supercritical Water Processes*, Elsevier, p. 9–93.
- Didana, Y.L., Heinson, G., Thiel, S. & Krieger, L., 2017. Magnetotelluric monitoring of permeability enhancement at enhanced geothermal system project, *Geothermics* 66, p. 23-38.
- Duval, Y., Mielczarski, J.A., Pokrovsky, O.S., Mielczarski, E. and Ehrhardt, J.J., 2002. Evidence of the existence of three types of species at the quartz - aqueous solution interface at pH 0 - 10: XPS surface group quantification and surface complexation modeling. *The Journal of Physical Chemistry B* 106: pp. 2937–2945.
- Emberley, S., I. Hutcheon, M. Shevalier, K. Durocher, W.D. Gunter, E.H. Perkins, 2004. Geochemical monitoring of fluid-rock interaction and CO₂ storage at the Weyburn CO₂-injection enhanced oil recovery site, Saskatchewan, Canada. *Energy* 29, p. 1393-1401.
- Flechsigt, C., Fabig, T., Rücker, C. & Schütze, C., 2010. Geoelectrical investigations in the Cheb Basin/W-Bohemia: An approach to evaluate the near-surface conductivity structure. *Stud. Geophys. Geod.* 54: p. 443–463.
- Galkin, A.A., Lunin, V.V., 2005. Subcritical and supercritical water: a universal medium for chemical reactions. *Russ. Chem. Rev.* 74, 21–35.

- Kummerow, J., Raab, S., Schuessler, J. A., Meyer, R., 2018. Non-reactive and reactive experiments to determine the electrical conductivities of aqueous geothermal solutions up to supercritical conditions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, in press, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.05.014>
- Lockner, D. A., and J. D. Byerlee, 1985. Complex resistivity measurements of confined rock, *J. Geophys. Res.*, 90(B9), 7837–7847.
- Peacock, J. R., Thiel, S., Heinson, G. S., & Reid, P., 2013. Time-lapse magnetotelluric monitoring of an enhanced geothermal system. *Geophysics*, 78, B121-B130.
- Quist, A.S., Marshall, W.L., 1968. Electrical conductances of aqueous sodium chloride solutions from 0 to 800 °C and at pressures to 4000 bars. *J. Phys. Chem.* 72, 684–703.
- Schön, J., 2015. Physical Properties of Rocks - Fundamentals and Principles of Petrophysics, vol. 18 of Handbook of Geophysical Exploration. 2nd edn. Elsevier.
- Skold, M., Revil, A. and Vaudelet, P., 2011. The pH dependence of spectral induced polarization of silica sands: Experiment and modeling. *Geophysical Research Letters* 38. L12304.
- Tietze, K. & Ritter, O., 2014. Electromagnetic monitoring of the propagation of an injected polymer for enhanced oil recovery in Northern Germany. 76th EAGE Conference and Exhibition, expanded abstract, p. 1091-1095.
- Tsuchiya, N., Asanuma, H., Okamoto, A., Sakaguchi, K., Hirano, N., Kizaki, A., Watanabe, N., 2015. Fundamental study for beyond brittle. Geothermal reservoirs. Proceedings, World Geothermal Congress 2015.
- Uematsu, M., Franck, E.U., 1980. Static dielectric constant of water and steam. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 9 (4), 1291–1306.
- Weingärtner, H., Franck, E.U., 2005. Supercritical water as a solvent. *Angew. Chem. Int. Ed.* 44, 2672–2692 (and references therein).
- Wigand, M.; Carey, J.; Schütt, H.; Spangenberg, E. and Erzinger, J., 2008. Geochemical effects of CO₂ sequestration in sandstones under simulated in situ conditions of deep saline aquifers. *Applied Geochemistry* 23: pp. 2735–2745.
- Zisser, N. & Nover, G., 2009. Anisotropy of permeability and complex resistivity of tight sandstones subjected to hydrostatic pressure. *Journal of Applied Geophysics* 68, p. 356-370.

Applications of induced polarization imaging for site characterization and the evaluation of remediation techniques

Adrián Flores-Orozco¹, Matthias Buecker², Carsten Rücker³, Andreas Kemna⁴, and Frank Börner³

- 1) TU-Wien, Forschungsbereich Geophysik - Department für Geodesie und Geoinformation (Wien, Österreich). E-Mail: flores@tuwien.ac.at
- 2) TU Braunschweig, Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik (Braunschweig, Deutschland). E-Mail: m.buecker@tu-bs.de
- 3) TU-Berlin, Angewandte Geophysik, Institut für Angewandte Geowissenschaften (Berlin, Deutschland). E-Mail: carsten.ruecker@mailbox.org, frank.boerner@tu-berlin.de
- 4) Universität Bonn, Bereich Geophysik, Institut für Geowissenschaften und Meteorologie (Bonn, Deutschland). E-mail: kemna@geo.uni-bonn.de

1. Abstract

We present induced polarization (IP) imaging results for data collected at different study areas for the characterization of contaminant plumes. Our results show the benefits of using the IP method to improve the interpretation of traditional electrical resistivity tomography (ERT) surveys. The IP data presented here were collected in industrial areas subject to cultural noise (e.g., buried infrastructure); hence, our review also allows evaluating the effect of such noise on the imaging results. In particular, we focus our analysis on the characterization of hydrocarbon contaminants, which represent one of the most common sources of pollution in groundwater, addressing both dense and light non-aqueous phase liquids (NAPL). We also present a comparison of imaging results for data collected in time and frequency domain, which clearly demonstrates the possibility to gain comparable results with a variety of commercial instruments. Regarding the evaluation of remediation techniques, we present monitoring results of data collected along the injection of microparticles for the transformation of a shallow contaminant plume. Our interpretation is assessed through geochemical data. We also discuss the interpretation of the IP images based on the modeled response using a recently developed analytical pore-scale membrane-polarization model.

2. Introduction

Modern groundwater-remediation techniques use the injection of reactive nano- and micro-scale particles into the subsurface for the in-situ detoxification of pollutants (e.g., Griger et al., 2010 and references therein). Besides reduced remediation times, the main advantage of particles injections is the possibility to reach areas not accessible by means of other methods such as: (i) pollutants underneath buildings, (ii) deep contaminant plumes, and (iii) aquifers with low hydraulic conductivities. Nevertheless, concerns have been raised regarding the toxicity of the particles and the occurrence of renegade particles, i.e., particles that are delivered off-target (e.g., Bianco et al., 2017). The present paper is focused on the injection of micro-scale particles, as this is an emerging technique and most of the parameters of interest (i.e., subsurface heterogeneity, geometry of the contaminant plume, chemical variations in groundwater composition, assessment of the efficiency in subsurface amendment) are similar for other common remediation strategies (i.e., pump-and-treat, chemical oxidation, etc.). The case of bioremediation has been addressed in other studies (we refer to e.g., Flores Orozco et al., 2011; 2013). Prior to remediation, site characterization must provide information about the subsurface properties with a high spatial resolution. Such information is critical to identify lithological units, which in turn can act as preferential flow paths or barriers for the transport of contaminants and, for instance, of the subsurface

amendment for groundwater remediation (e.g., nanoparticles). To date, site characterization is mostly based on the analysis of soil and water samples, which provide direct information about contaminant concentration and lithology. However, this approach strongly depends on the distribution of the available sampling points and is not suited for monitoring applications. Moreover, the determination of contaminant concentrations from water samples may be challenging at sites impacted by non-aqueous phase liquids (NAPL), because an important fraction of NAPL might be “trapped” in the pore space (or at the surface of the solid phase) and, thus immobilized. Accordingly, groundwater sampling in low permeable materials might be impossible; thus, resulting in an underestimation of contaminant concentrations. In recent years, induced polarization (IP) imaging has emerged as a promising method for site characterization and the monitoring of biogeochemical changes accompanying remediation (e.g., Flores Orozco et al., 2011; 2013; 2015; Kemna et al., 2012; Binley et al., 2016; Ntarlagiannis et al., 2018). In the following sections, we will present different case studies highlighting the advantages and drawbacks of the method for practitioners. The imaging results presented here are given in terms of magnitude ($|\sigma|$) and phase (ϕ) of the complex conductivity (σ^*). The inversion of the data was performed with CRTomo, a smoothness-constraint inversion code by Kemna (2000). To differentiate between model and data parameters, measurements are expressed in terms of the magnitude (i.e., the transfer resistances, R) and the apparent phase shift (ϕ_a) of the electrical impedance. Data error was quantified based on the analysis of the normal-reciprocal misfit, as described in Flores Orozco et al. (2012a).

3. Low-frequency electrical properties of hydrocarbon contaminants

Considering that hydrocarbons are practically electrically insulating, DC-resistivity methods appear adequate for the characterization of hydrocarbon-impacted sites (e.g., Sauck 2000). However, over the last two decades, several studies have demonstrated that measurements on mature hydrocarbon plumes can reveal high electrical conductivity values following the natural biotic and abiotic transformation of contaminants (for details we refer to Atekwana and Atekwana, 2010, and references therein). Hence, monitored natural attenuation has emerged as an alternative remediation technique, especially for large contaminated areas (Barker et al., 1987; Ntarlagiannis et al., 2018 and references therein). Here, hydrocarbons act as an energy source promoting microbial growth, resulting in the transformation of contaminants and the release of metabolic products such as carbonic acids, which increase the ion concentration and, thus, the fluid electrical conductivity (σ_w). Besides this, carbonic acids may contribute to the weathering of grain surfaces and the generation of secondary porosity, further increasing the σ' assessed by DC-resistivity surveys (e.g., Abdel Aal et al., 2006; Atekwana and Atekwana, 2010, and references therein). Regarding the IP effect, initial studies (e.g., Vanhala, 1997; Olhoeft, 1985; Kemna et al., 2004) revealed a significant increase in the polarization effect with increasing concentration of non-polar hydrocarbons, such as toluene, benzene, or kerosene. However, recent studies (Ustra et al., 2012; Schwatz et al., 2012; Shefer et al., 2013) reported a negligible polarization response in laboratory measurements for similar compounds. Due to their lack of ionic or polar groups, “non-polar” compounds form discrete droplets caged within the water-filled pores and without a direct contact with the grain surface (Figure 1), and thus, are also referred to as “non-wetting” oil. Schmutz et al. (2010) proposed a modification of the model describing the polarization of the Stern layer to include the effect of non-wetting hydrocarbons. Their model predicts an increase in the IP response with increasing volumetric content of non-wetting hydrocarbons. Revil et al. (2011) extended the measurements done by Schmutz et al. to also study the IP response of polar compounds (e.g., halocarbons such as TCE), also referred to as “wetting” hydrocarbons, as those are in direct contact with the grain surface (Figure 1). Their measurements revealed a decrease in the IP response with increasing volumetric content of polar hydrocarbon compounds.

Bücker et al. (2017) proposed an extension of the analytical model for membrane polarization to study the IP effect associated with the presence of both “wetting” or “non-wetting” hydrocarbon compounds in the pore space. Their model predicts a monotonous decrease of the IP response with hydrocarbon saturation in the case of wetting hydrocarbons (Figure 1). Also in the case of non-wetting hydrocarbons (Figure 1), the IP response decreases at high hydrocarbon saturations. However, depending on the surface properties of the particular hydrocarbon contaminant, the model by Bücker et al. (2017) can also explain a maximum of the IP response at intermediate hydrocarbon concentrations.

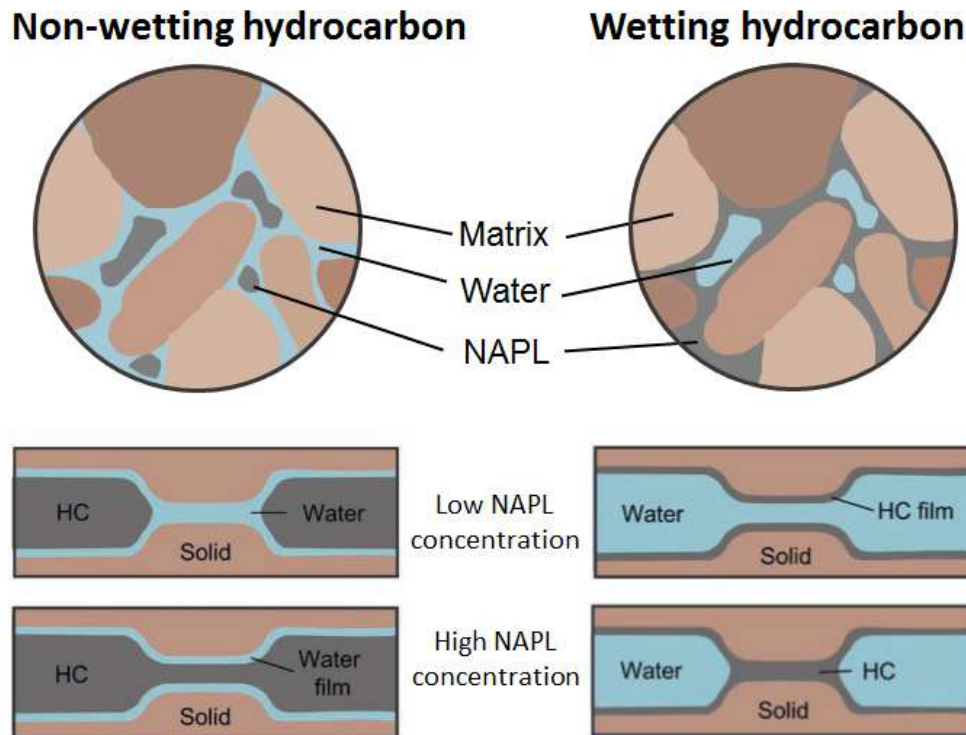


Figure 1: Schematic representation of the pore-scale configuration of non-wetting (i.e., non-polar) and wetting (i.e., polar) hydrocarbons (left and right plot, respectively). Plots in the bottom represent the expected changes in the micro- and macro-pores controlling the membrane polarization. In the case of non-wetting hydrocarbons, low NAPL concentrations lead to the formation of disconnected NAPL droplets trapped in the macro pores, favoring the formation of ion selective membranes in the macro pores only. Increasing the NAPL concentration results in the formation of a continuous hydrocarbon film, which extends over micro and macro pores and leads to the breakdown of membrane polarization. Figure modified from Bücker et al. (2017).

The production of bio-surfactants during the transformation of hydrocarbons in mature plumes can also modify the surface properties of the hydrocarbons (e.g., Cassidy et al., 2001) and, for instance, promote a change from “non-wetting” oil to “wetting” oil, thus, resulting in modifications of the geoelectrical response. Additionally, the IP response of contaminated sites might change due to biofilm formation, as observed in lab-measurements (e.g., Abdel Aal et al., 2006; Atekwana and Slater, 2009).

4. Case study 1: Benzene contaminant plume (polar compound)

a. Discrimination between the source-zone and the plume

IP measurements were collected on the grounds of a former hydrogenation plant in an area impacted mainly by benzene, which – at certain locations – revealed concentrations in groundwater above the saturation concentration (~ 1.7 g/l) and the occurrence of contaminants in free phase. The aquifer is composed of fluvial quaternary gravel underlined by a low permeable layer of clay and lignite at 11 m depth, with the groundwater table found at ~ 8 m depth. IP measurements were collected in the frequency domain (FDIP) along a single profile using 36 stainless steel electrodes, with a separation of 2.5 m between electrodes and a dipole-dipole skip-3 configuration (i.e., with a dipole length of 4 times the electrode spacing for both current and potential dipoles). To gain information about the frequency dependence of the electrical properties, measurements were repeated for 14 frequencies between 0.07 and 1000 Hz (see Flores Orozco et al., 2012b for further details).

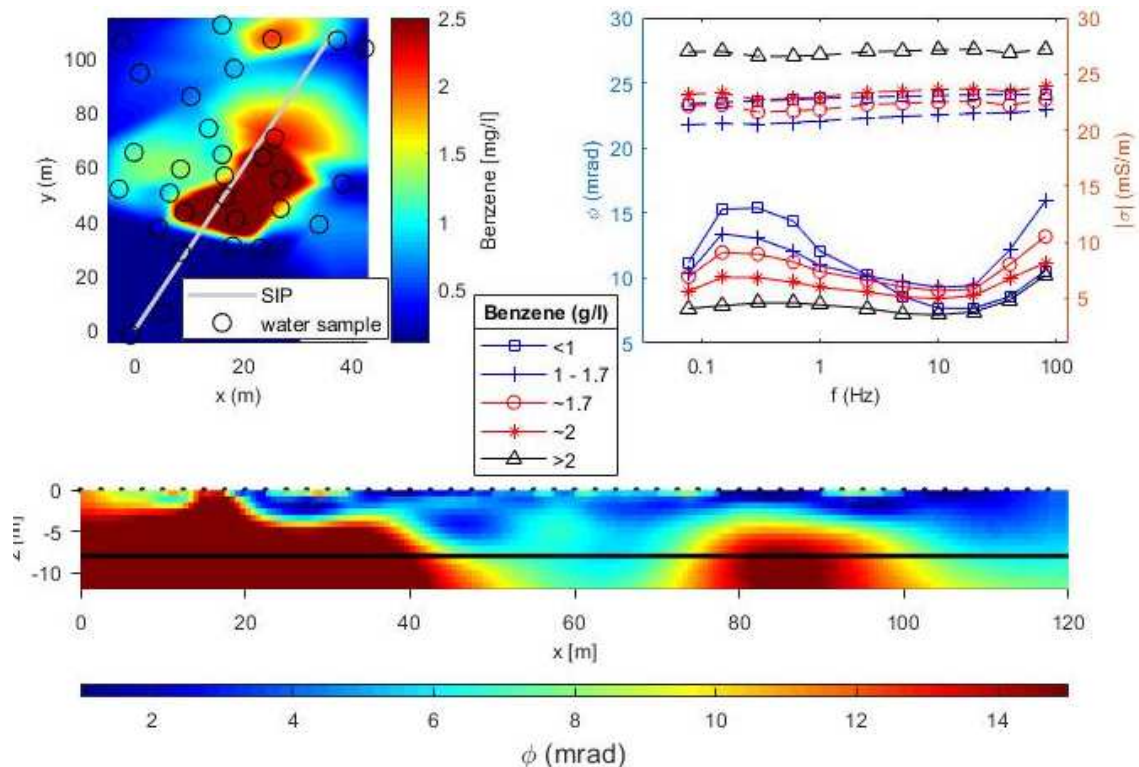


Figure 2: improved characterization at a benzene-contaminated site (top left). Imaging results reveal an abrupt decrease of the IP response (ϕ) in areas characterized by the occurrence of free-phase products (plot on the bottom). For benzene concentrations below saturation concentration, the spectral response in the low frequencies (< 40 Hz) exhibits a clear peak; whereas higher BTEX concentrations reveal flat spectra characterized by a low polarization effect (top right, ϕ : solid curves, $|\sigma|$: dashed curves). Figure modified from Flores Orozco et al. (2012b).

Electrical images in Figure 2 reveal: (1) a negligible IP effect (expressed in terms of ϕ) for the area corresponding to the higher contaminant concentrations (> 1.7 g/l) between ~ 40 and 90 m along the profile direction; and (2) high ϕ values in areas related with lower benzene concentrations. The spectral signature of the highly contaminated area (occurrence of free-phase contaminant) shows a negligible polarization and the so-called constant-phase response. Contrary to this behavior, pixel values extracted from areas with benzene

concentrations below the saturation concentration reveal a typical Cole-Cole response, characterized by a critical frequency around 0.5 Hz, and an increase in the amplitude of the IP effect in the low frequencies (<10 Hz) with decreasing contaminant concentrations. In general, the SIP response observed in Figure 2 reveals consistency with previous laboratory investigations (Schmutz et al., 2010). The observed increase in the polarization values at high frequencies (>40 Hz), is likely related to electromagnetic or capacitive coupling effects.

b. Comparison of frequency-domain and time-domain results

Today, most of the instruments used for DC-resistivity surveys can also collect time-domain IP data (TDIP). The measurements are based on current injections using a square waveform, where the voltage decay after switching of the current is commonly integrated over a given time yielding the so-called integral chargeability (for further details see e.g., Ward, 1990). Yet, measurements can also be performed in the frequency-domain (FDIP) where a phase-shifted voltage relative to an injected alternating current is measured, and the measurements are given in terms of resistance and phase of the measured electrical impedance. Hence, a common concern is the consistency of TDIP and FDIP data and imaging results.

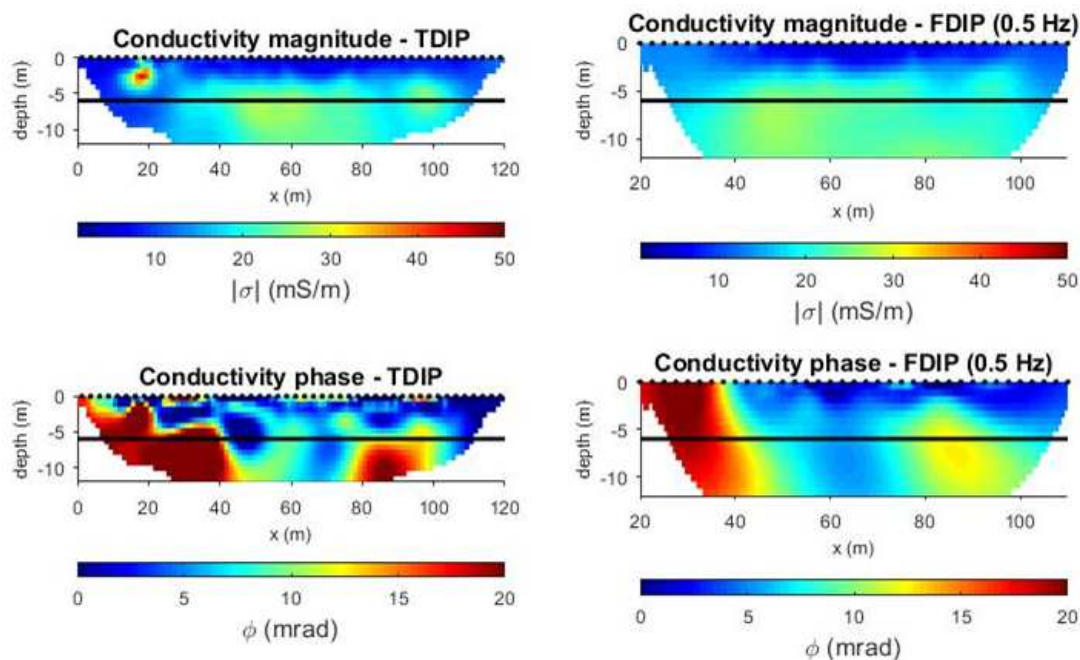


Figure 3: IP imaging results for data collected in the time domain (TDIP – on the left side) and in the frequency domain (FDIP – on the right side). The black dots and the horizontal line indicate the position of the electrodes (at the surface) and groundwater (at ~ 6 m depth), respectively. For further details, we refer to Flores Orozco et al. (2012b).

In Figure 3, we present images for TDIP and FDIP data collected along the same profile using two different instruments to demonstrate that both techniques can provide comparable results. Independent of the acquisition system, plots in Figure 3 reveal consistent electrical responses. Here, images of the conductivity magnitude ($|\sigma|$) show high values explained by changes in the subsurface due to biogeochemical processes. Images of the conductivity phase (ϕ) reveal the same spatial variations as discussed before, corresponding to lateral variations in the benzene concentrations, with the lowest IP values related to the occurrence of free-phase hydrocarbon.

5. Case-study 2: TCE contaminant plume (non-polar compound)

a. Baseline measurements

At the second site, measurements were collected inside an industrial building, where the production of solvent-based paints resulted in the contamination of the shallow subsurface by chlorinated aliphatic hydrocarbons (CAHs), with particularly high concentrations of chlorinated ethane (TCE) in the groundwater (see Figure 4). IP measurements were performed one day before the injection of guar-gum coated microscale zero-valent iron (GG-mZVI), which targeted a sandy aquifer between 8 and 12 m depth (see Figure 4). During the IP survey the water table was found at 2.5 m below ground surface (bgs).

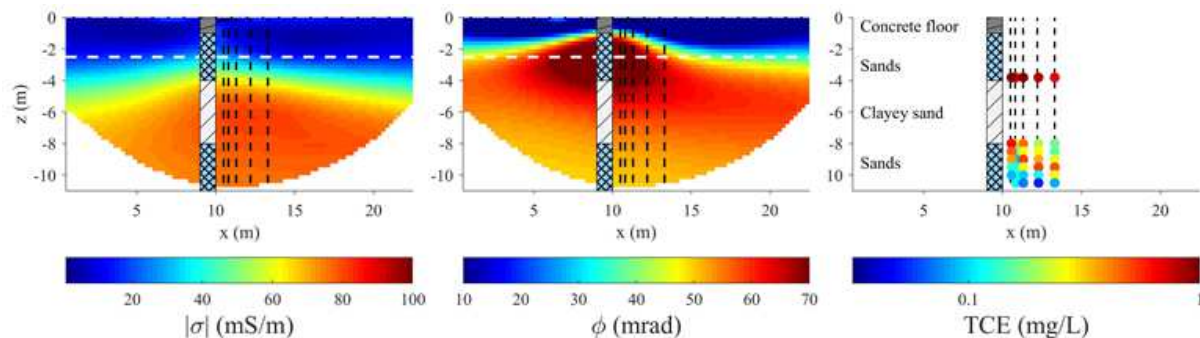


Figure 4: Left and center: IP imaging results for baseline data collected at a TCE-contaminated site. Right: Lithological information and TCE concentrations for the interpretation of the electrical images. The dashed vertical lines indicate the position of multi-layer sampling wells used for the sampling of groundwater for geochemical analysis. The horizontal dashed line indicates the depth of the groundwater table during the IP survey, the dots at the surface the electrode positions. Figure modified from Flores Orozco et al. (2015).

IP measurements were conducted at 1 Hz along one profile deploying 24 electrodes with an electrode separation of 1 m using a dipole-dipole “skip-3”, “skip-4”, and “skip-5” measuring protocol (dipole lengths of 4, 5 and 6 m). The measurement protocol was designed for a depth of investigation of 11 m and optimized to collect an entire data set in less than 15 minutes – the time required for one nZVI injection and the relocation of the pump at the next depth. The CCI profile was oriented parallel to groundwater flow and centered at the nZVI injection point. For further details, we refer to Flores Orozco et al. (2015).

The electrical images presented in Figure 4 reveal four main units corresponding to the site’s lithology, whereas the anomaly characterized by the highest $|\sigma|$ and ϕ values corresponds to the distribution of high TCE concentrations measured in groundwater samples (right plot in Figure 4). Here, the increase of the polarization effect can be attributed to the polar nature of TCE. Such compounds cause an increase of the electric surface charge at the hydrocarbon-water interface resulting in an increased polarization response (at least at moderate pollutant concentrations, see e.g. Bucker et al., 2017). The lack of TCE data in the clay-sand aquitard, illustrates the difficulty to collect water samples from low permeable materials hindering also the quantitative interpretation of the electrical images.

b. Monitoring GG-mZVI injections for groundwater remediation

Furthermore, larger changes (>50%) can be observed in shallow sediments, a few meters away from the injection, suggesting the migration of particles along preferential flow paths. Such preferential paths likely correspond to fractures created during the injection that resulted in a delivery of the particles off-target. Correlation of the electrical response and geochemical data, in particular the analysis of cores recovered after the injection, confirmed

the migration of particles (and stabilizing solution) to shallow areas through fractures that formed during the injection. Additionally, Figure 5 reveals that properly delivered particles in the deep aquifer (between 8 and 10 m depth) correspond to an increase in the IP response, likely due to the enzymatic consumption of the guar-gum coating. Here, the bare particle allows the development of electrode polarization. On the contrary, the shallow anomaly due to particles delivered off-target reveals a decrease in the IP response. Particles accumulated in the unsaturated zone do not lose the guar-gum coating as the enzymes are added at the end of each injection cycle and most probably remain in the deep aquifer; hence, the metallic surfaces are not in direct contact with the electrolyte, hindering the development of electrode polarization.

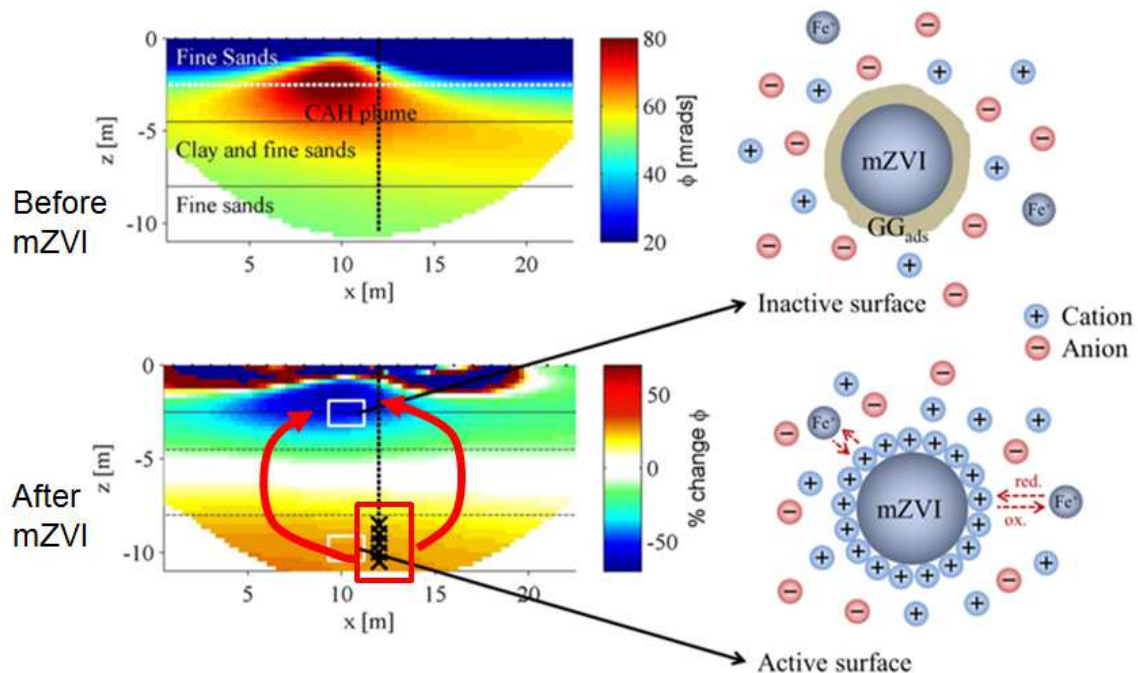


Figure 5: IP response before (top left) and after (bottom left) the injection of guar-gum coated micro zero-valent iron (GG-mZVI) particles for the remediation of a TCE contaminant plume. Spatial variations in the IP response are related to the accumulation of: bare particles at the injection points (between 8 and 10 m depth - indicated by "x" symbols), and coated GG-mZVI off-target in the unsaturated zone, delivered through fractures during the injection (indicated by the red arrows). The position of the electrodes and the injection well are indicated by the black dots and the vertical dashed line, respectively, whereas the dashed horizontal lines represent lithological contacts (black) and the groundwater table (white). Figure modified from Flores Orozco et al. (2015)

6. Case-study 3: Detecting porosity changes to monitor artificial compaction

An empirical model relates the imaginary part of the interface conductivity to pore space parameters like the surface area-to-pore volume ratio, cementation, and porosity (e.g., Börner et al., 1996 and references therein). If the cementation and the specific surface area are kept constant, a decreased porosity leads to an increased surface area-to-pore volume ratio and thus to a variation of measured phase angles in IP responses. Accordingly, a porosity change due to the compaction of unconsolidated material can be reconstructed from measured phase angles assuming full saturation with a fluid characterized by a constant electrical conductivity.

The investigation took place at a former dump of an opencast lignite mining in Germany. The region was refilled with loose quaternary and tertiary shaly sand and silt with high porosity. The ground water table was determined between ~6 and 7 m depth. A narrow grain size

distribution and well-rounded grain shapes lead the material to an off-limit region for safety reasons due to potential quicksand dangers; thus, different methods were applied to compact the ground (Gudehus et al., 2014).

Following the remediation, SIP soundings were performed to monitor the success of the artificial compaction using a Fuchs II system (Radic Research). The survey design was a Schlumberger configuration with MN/2 of 1 m and different AB/2 from 1 m up to 56 m. The current electrodes were non-polarizable lead plates and for the potential measurement, clay embedded electrochemical glass-electrodes were used.

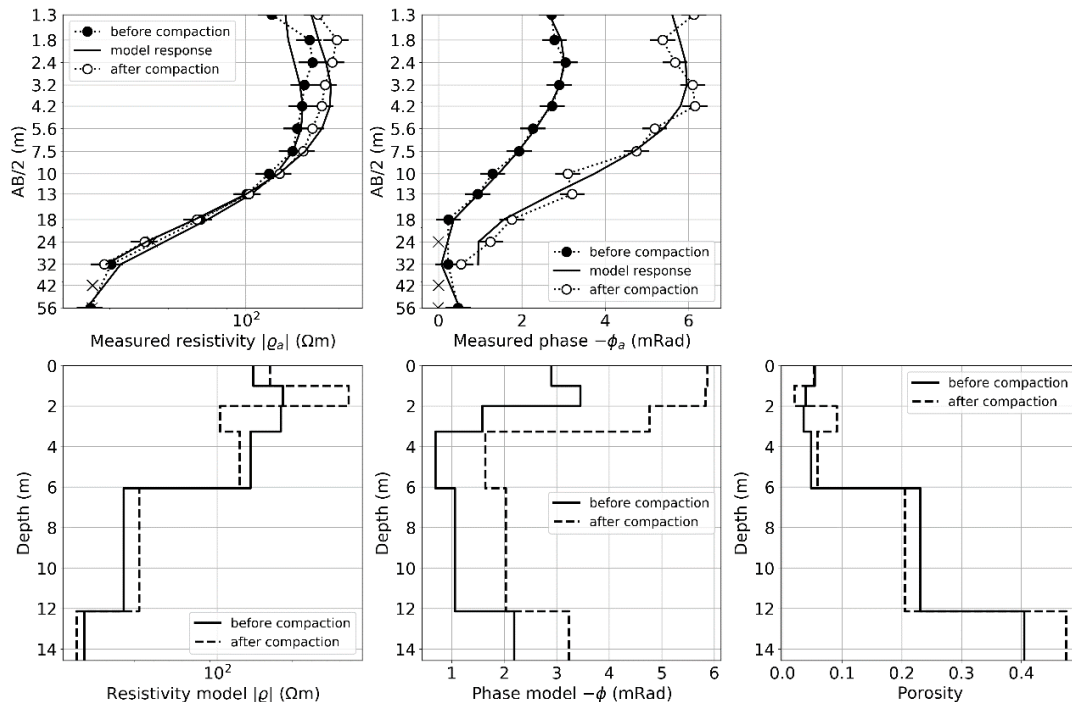


Figure 6: Measured apparent resistivity and phase data (first row) of a repeated Schlumberger sounding before and after the artificial compaction of the dump of an opencast mining. The inverted resistivity and phase models (second row) determine the variations in porosity at depth after application of an empirical petrophysical model assuming fully saturated conditions below 6 m depth. Figure modified from Börner et al. (2017).

The complex apparent resistivity values were calculated assuming a constant-phase-angle (CPA) behavior (Börner et al., 1996). The mean values of the measurements (in terms of apparent resistivity and phase) were calculated from 5 single-frequency measurements, resulting in sets of Schlumberger sounding curves before and after the compaction process. The data were processed using the 1D-VESC inversion module of the software package PyGIMLI (Rücker et al., 2017). All inversions were processed using the same starting model and inversion parameters. Since the inversion was focused on the specific electrical parameters of the layers, the layer boundaries were considered to be constant laterally.

Figure 6 shows exemplarily the measured data and the inversion results for one selected IP sounding curve. A successful compaction can be detected with porosity reductions in the range of 0.01 to 0.2 for the depth of interest between 6 and 20 m. Several direct push soundings were performed near the IP-sounding position and reveal a porosity reduction between 0.005 and 0.035. Unfortunately, there is no direct quantitative comparison of the results for both methods because their measurement volume is different.

This investigation shows the correlation between IP parameters and changes in the compaction of unconsolidated shaly sand with high porosity. The change of the surface area-to-pore volume ratio caused different IP responses and allows for the determination of relative porosity variations without a-priori information. Our results show that IP measurements have the potential for in situ estimation of porosity changes in shaly sands in connection with the compaction of mining dumps.

7. Conclusions

Our results show the clear potential of the IP method to delineate spatio-temporal changes associated with contaminants as well as involved hydro- and bio-geochemical changes in the subsurface. Recently developed models for the membrane polarization effect associated with immiscible fluids trapped within the pore-space reveal consistent patterns to those observed at the field scale, promising an improved quantitative interpretation of the IP images for data collected at the field scale. The quantitative derivation of relevant parameters (e.g., porosity) was also revealed in SIP measurements performed along the remediation of mining dumps. Yet, further research is needed to improve the quality of IP measurements at higher frequencies and the interpretation of the SIP response.

8. References

- Abdel Aal, G.Z., Slater, L.D., and Atekwana, E.A. [2006] Induced-polarization measurements on unconsolidated sediments from a site of active hydrocarbon biodegradation. *Geophysics*, 71(2), H13-H24
- Atekwana, E.A. and Atekwana, E.A. [2010] Geophysical Signatures of Microbial Activity at Hydrocarbon Contaminated Sites: A Review. *Surveys in Geophysics* 31, 247-283
- Atekwana E.A., and Slater, L.D. [2009] Biogeophysics: A new frontier in Earth science research. *Reviews of Geophysics* 47, RG4004.
- Barker, J.P., Patrick, G.C., and Major, D. [1987] Natural attenuation of aromatic hydrocarbons in a shallow sand aquifer. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 7(1), 64-71.
- Binley A., Keery, J., Slater, L., Barrash, W., and Cardiff, M. [2016] The hydrogeologic information in cross-borehole complex conductivity data from an unconsolidated conglomeratic sedimentary aquifer. *Geophysics*, 81(6), E409-E421
- Börner, F., Schopper, J., Weller, A. [1996] Evaluation of Transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements. *Geophys. Prosp.* 44, 583-601.
- Börner, F., Müller-Huber, E., Branka, D., Rücker, C. [2017] The effect of compaction on complex electrical resistivity of shaly sands. *Near Surface Geophysics* 6, 633 - 643
- Bücker, M., Flores Orozco, A., Hördt, A., and Kemna, A. [2017] An analytical membrane-polarization model to predict the complex conductivity signature of immiscible liquid hydrocarbon contaminants. *Near Surface Geophysics* 15, 547 - 562
- Cassidy, D.P., Werkema Jr D.D., Sauck, W., Atekwana, E., Rossbach, S., and Duris, J. [2001] The effects of LNAPL biodegradation products on electrical conductivity measurements. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 6(1), 47-52.
- Deceuster, J. and Kaufmann, O. [2012] Improving the delineation of hydrocarbon-impacted soils and water through induced polarization (IP) tomographies: A field study at an industrial waste land. *Journal of Contaminant Hydrology* 136–137, 25-42.
- Flores Orozco, A., Kemna, A., Oberdörster, C., Zschornack, L., Leven, C., Dietrich, P., and Weiss, H. [2012b] Delineation of subsurface hydrocarbon contamination at a former

- hydrogenation plant using spectral induced polarization imaging. *J. of Contaminant Hydrology*, 136-137, 131-144.
- Flores Orozco, A., Velimirovic, M., Tosco, T., Kemna, A., Sethi, R., and Leen, B. [2015] Monitoring the injection of microscale zero-valent iron particles for groundwater remediation by means of complex electrical conductivity imaging. *Environmental Science & Technology*. 49(9), 5593–5600
- Flores Orozco, A., Williams, K.H., Long, P.E., Hubbard, S.S., and Kemna, A. [2011] Using complex resistivity imaging to infer biogeochemical processes associated with bioremediation of a uranium-contaminated aquifer. *Journal of Geophysical Research* 116, G03001.
- Flores Orozco, A., Williams, H.K., and Kemna, A. [2013] Time-lapse spectral induced polarization imaging of stimulated uranium bioremediation. *Near Surface Geophysics*, 11, 531-544.
- Flores Orozco, A., Zimmermann, E., and Kemna, A. [2012a] Data error quantification in spectral induced polarization imaging. *Geophysics*, 77(3), E227 – E237
- Grieger, K.D., Fjordboge, A., Hartmann, N.B., Eriksson, E., Bjerg, P.L., and Baun, A. [2010] Environmental benefits and risks of zero-valent iron nanoparticles (nZVI) for in situ remediation: Risk mitigation or trade-off? *Journal of Contaminant Hydrology* 118, 165-183
- Gudehus, G., Kessler, J. and Lucke, B. [2015]. Flow slide. *Geotechnik* 38, 255-266
- Kemna, A. 2000. Tomographic inversion of complex resistivity - theory and application, Ph.D., Ruhr-University of Bochum.
- Kemna A., Binley, A., Cassiani, G., Niederleithinger, E., Revil, A., Slater, L.,..., Flores Orozco, A., ..., and Zimmermann, E. [2012] An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications. *Near Surface Geophysics*, 10, 453-468
- Kemna, A., Binley, A., and Slater, L. [2004] Crosshole IP imaging for engineering and environmental applications. *Geophysics*, 69, 97-107.
- Olhoeft, G.R. [1985] Low-Frequency Electrical-Properties. *Geophysics*, 50, 2492-2503.
- Revil, A., Schmutz, M., and Batzle, M.L. [2011] Influence of oil wettability upon spectral induced polarization of oil-bearing sands. *Geophysics*, 76(5), A31-A36.
- Rücker, C., Günther, T. and Wagner, F.M. [2017] pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers and Geosciences*. 109, 106-123
- Sauck, W.A. [2000] A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of Applied Geophysics*, 44, 151-165.
- Schmutz, M., Revil, A., Vaudelet, P., Batzle, M., Viñao, P.F., and Werkema, D.D. [2010] Influence of oil saturation upon spectral induced polarization of oil-bearing sands. *Geophysical Journal International*, 183, 211-224
- Schwartz, N., Huisman, J. A., and Furman, A. [2012] The effect of NAPL on the electrical properties of unsaturated porous media. *Geophysical Journal International*, 188(3), 1007-1011.
- Shefer, I., Schwartz, N., and Furman, A. [2013] The effect of free-phase NAPL on the spectral induced polarization signature of variably saturated soil. *Water Res. Research*, 49(10), 6229-6237.
- Vanhala, H. [1997] Mapping oil-contaminated sand and till with the spectral induced polarization (SIP) method. *Geophysical Prospecting*, 45, 303-326.
- Ustra, A., Slater, L., Ntarlagiannis, D., and Ellis, V. [2012] Spectral induced polarization (SIP) signatures of clayey soils containing toluene. *Near Surface Geophysics*, 10(6), 503-515

Hochauflösende Tiefengeoelektrik und Zeitbereichs IP Messungen zur Unterstützung der Erzexploration in Afrika

Autoren: Michael Tauchnitz¹, Dr. Dietmar Kopp², Klaus Brauch³

1. terratec Geophysical Services, Germany, Tauchnitz@terratec-geoservices.com

2. terratec Geophysical Services, Germany, Kopp@terratec-geoservices.com

3. terratec Geophysical Services, Germany, Brauch@terratec-geoservices.com

Zusammenfassung – Weite Teile Europas sind geologisch und geophysikalisch untersucht. Viele Lagerstätten sind historisch bekannt und die Entdeckung neuer oberflächennaher Lagerstätten wird zunehmend schwieriger. Zur Erkundung tieferer Lagerstätten stellt das „cultural noise“ im dichtbesiedelten Europa ein zusätzliches Problem bei der Erfassung qualitativ hochwertiger geophysikalischer Messdaten dar. Gezwungenermaßen rücken entlegene und meist schwer zugängliche Gebiete in den Fokus der Explorationstätigkeit. Hierzu gehört auch Afrika, ein Kontinent mit großen Erzvorkommen. In den ariden Gebieten und Wüstenregionen Westafrikas ist die geologische Kartierung und Beprobung aufgrund der schlechten Aufschlussbedingungen bedingt durch bis zu 100 m mächtige tropische Verwitterungsdecken und Sandauflagerungen schwierig. Daher spielt die Geophysik bei der Exploration in diesen Gebieten eine besonders wichtige Rolle und wird routinemäßig eingesetzt. Aufgrund der oberflächennahen geringen lithologischen und tektonischen Information sind die Wahl der richtigen geophysikalischen Messmethode(n) und die Planung (Auflösung, Tiefenbereich) der geophysikalischen Messkampagne schwierig.

Die Gleichstromgeoelektrik (ERT = Electrical Resistivity Tomography) und die Methode der induzierten Polarisation (IP) sind hierbei die weltweit am häufigsten eingesetzten Messmethoden zum Auffinden feinverteilter Vererzungen. Wir setzen diese Verfahren weltweit seit 30 Jahren unter anderem in der Wasser- und Mineralprospektion ein. In diesem Beitrag soll anhand eines Beispiels gezeigt werden, welchen Beitrag die Methoden in der Erzprospektion bzw. bei der geologischen Modellerstellung und Modelanpassung leisten können und was bei der Planung und Durchführung einer ERT/IP Messkampagne zu beachten ist.

Einführung – Der Kontinent Afrika ist reich an Bodenschätzen wie Kupfer, Gold und Uran. Sieht man von den Großstädten ab, sind die meisten Teile des Kontinents sehr dünn besiedelt. Die fehlende Infrastruktur erschwert jedoch die Logistik von Explorationsvorhaben erheblich. Andererseits herrschen in diesen Gebieten, aufgrund der geringen anthropogenen Störeinflüsse (Elektroinstallation, Autoverkehr, Rohrleitungen, elektrifizierte Bahntrassen usw.), sehr gute geophysikalische Messbedingungen.

Zu Beginn eines Explorationsvorhabens werden für gewöhnlich existierende geologische Karten, hochauflösende Satellitenbilder, aber auch Daten aerogeophysikalischer Messungen ausgewertet. Hierdurch lassen sich größere prospektive Gebiete (z.B. 10 *10 km) deutlich eingrenzen. Diese Zielgebiete werden dann geologisch kartiert und geochemisch untersucht. Eine flächenhafte geologische Kartierung oder Beprobung ist oft aufgrund der lateritischen Verwitterung und/oder Sandbedeckung nicht möglich. Da Bohrungen in diesem Stadium zu teuer sind, muss man zur Erlangung detaillierter Informationen der Tektonik, der Lagerungsverhältnisse, dem Verlauf und Einfallen von Störungszonen, der Mächtigkeit der Verwitterungsschichten, die Tiefenlage der Grundgebirges oder auch die Art und Tiefe der Mineralisation, auf indirekte geophysikalische Messmethoden zurückgreifen.

Ziel dieser Messungen ist die Optimierung von teuren Bohrprogrammen. Hierzu werden oberflächennahe Daten mit hoher Auflösung, aber auch Information bis in mehrere hundert Meter Tiefe benötigt. Die maximale Erkundungstiefe fällt in der Regel mit der maximalen

Abbautiefe eines Tagebaus, die bei etwa 400 - 500 m liegt, zusammen. Die Gleichstromgeoelektrik und die Methode der Induzierten Polarisierung (ERT/IP) sind die wohl am weitesten verbreiteten geophysikalischen Techniken in der Erzerkundung.

Verglichen mit anderen Potentialverfahren, liefert ERT/IP ein sehr hohes oberflächennahes Auflösungsvermögen (in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand) und ermöglicht die Gewinnung von Messdaten aus verschiedenen Tiefenbereichen. Damit eignet sich das Verfahren besonders zur Beantwortung komplexer geologischer Fragestellungen. Die ERT Methode zielt auf die Kontraste im spezifischen elektrischen Widerstand von Gesteinen und Gesteinsformationen ab. Der spezifische Widerstand eines Gesteins wird dabei vor allem vom Anteil und der Salinität des Porenwassers bestimmt. Infolgedessen können unter anderem Aussagen zur Verwitterung oder der Klüftigkeit von Gesteinen getroffen werden. Aufgrund der tiefreichenden Verwitterung entlang von Störungszonen können diese damit detektiert werden. Neben dem Widerstand kann zusätzlich ein weiterer Parameter, die Aufladbarkeit (Induzierte Polarisierung) mitbestimmt werden. Die Induzierte Polarisierung (IP) ist das einzige Verfahren, das auf feinverteilte Vererzungen reagiert. Damit lassen sich zum Beispiel Kupfer- und Eisenerz- Lagerstätten direkt und indirekt, aufgrund ihrer Assoziation mit der sulfidischen Mineralisation, auch Gold- und Uranlagerstätten lokalisieren.

Die IP Messungen werden aufgrund des geringeren Zeitaufwands, und den bei großen Kabelauslagen und mit steigenden Frequenzen auftretenden starken elektromagnetischen Kopplungseffekten im Zeitbereich (TDIP) durchgeführt.

Während in der Vergangenheit lediglich Mittelwerte der gestapelten Widerstandswerte, Aufladbarkeiten bzw. die Abklingkurven mit nur wenigen Zeitfenstern abgespeichert wurden, ist es nun Standard, die komplette Zeitreihe mit sehr hohen Abtastraten aufzuzeichnen. Die Auswertung der Zeitbereichs IP Daten beschränkte sich bisher auf die Auswertung und Modellierung der Aufladbarkeiten. Die Aufnahme der kompletten Zeitreihen bietet nun, neben neuen Ansätzen bei der Filterung der Messdaten, vor allem die Möglichkeit der weiterführenden Auswertung der Transienten. Bei gegebener Datenqualität können beispielsweise durch eine Debye-Zerlegung mittlere Relaxationszeiten bestimmt werden, die in einem Zusammenhang mit den Korngrößenverteilungen der Erzminerale stehen. (Pelton et al., 1978, Nordsiek & Weller, 2008; Gurin et al., 2015)

Geologische Fragestellung vs. Messkonfiguration – Sind die zu untersuchenden Flächen sehr groß, werden zunächst kostengünstige geoelektrische Gradientenmessungen durchgeführt. Mit diesem Kartierungsverfahren erhält man rasch einen Überblick über die lateralen Änderungen der scheinbaren spezifischen Widerstände und der Aufladbarkeiten. Mit der Auswertung der erstellten Karten lassen sich Störungszonen gut detektieren, Lithologien gegeneinander abgrenzen und vererzte Bereiche anhand der erhöhten Aufladbarkeit lokalisieren. Diesen Informationen helfen, das Untersuchungsgebiet weiter einzugrenzen und Arbeiten mit höherem Auflösungsvermögen und finanziellem Aufwand zu planen. Das Einfallen von Störungszonen, die Verwitterungstiefen und die Tiefe der Mineralisation können aus den Gradientendaten nicht sicher gewonnen werden.

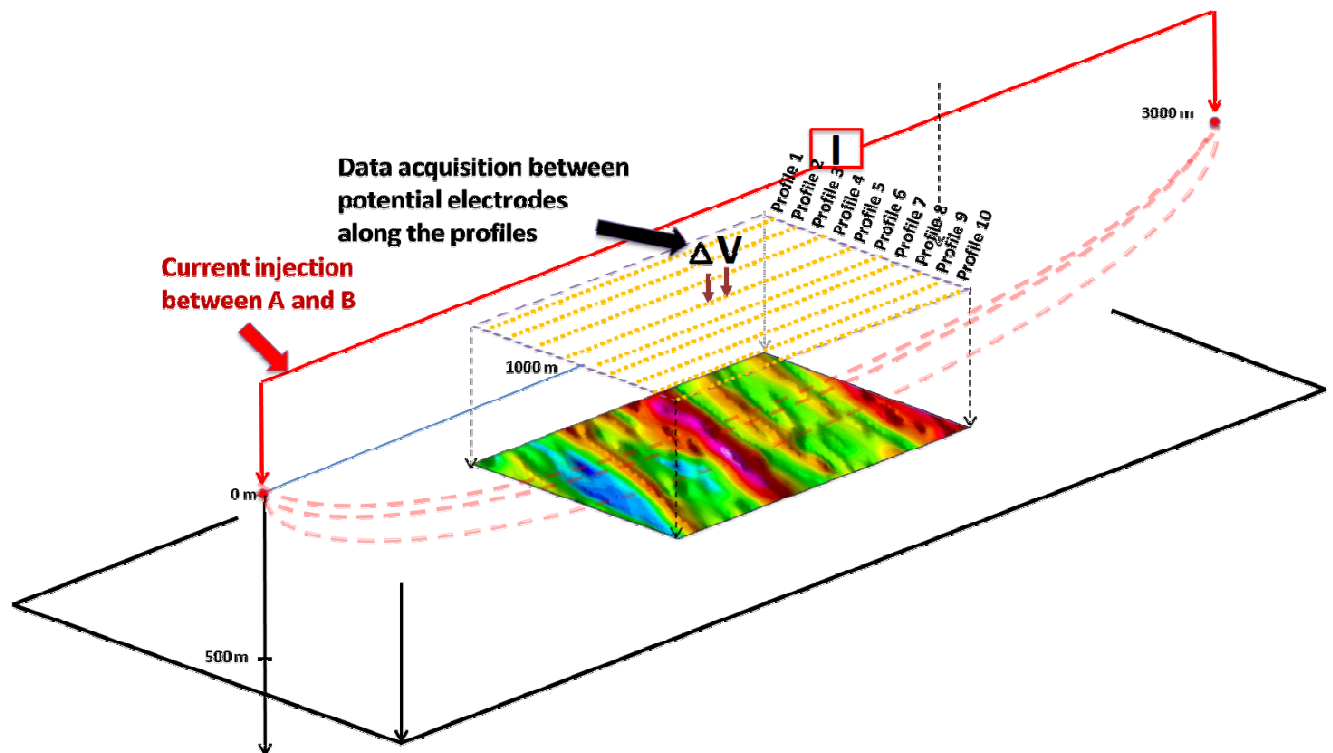


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Gradienten Surveys.

Hierfür führt man Kartierungssondierungen durch, die in der Regel mit Hilfe mehrkanaliger, vollautomatischer Multi-Elektroden-Apparaturen realisiert werden. Die Aufnahme von ERT und TDIP Daten bis mehrere hunderte Meter Tiefe ist allerdings mit diesen Multi-Elektroden Systemen schwierig. Das liegt zum einen daran, dass die Elektroden, verbunden über ein mehradriges Kabel (elektromagnetische Kopplung), zur Stromeinspeisung und zur Messung benutzt werden. Zudem ist die Akquise qualitativ akzeptabler TDIP Daten aus großen Tiefen nur mit großen Kabelauslagen/ Elektrodenabständen und durch die Injektion hoher Ströme, wie sie nur mit Hilfe von leistungsstarken Transmittern > 3 KVA erzeugt werden können, realisierbar.

In der Regel werden solche Messungen als „klassische“ Dipol-Dipol oder Pol-Dipol Anordnung mit festem Elektrodenabstand durchgeführt. Theoretisch lassen sich mit der Wahl eines entsprechend großen Elektrodenabstandes Messungen bis in große Tiefe realisieren. Praktisch sind solche großen Kabelauslagen im Feld schlecht oder gar nicht handelbar, da sowohl die Einspeiseelektroden als auch die Kabelauslage/Messelektroden entlang des Messprofils bewegt werden müssen. Zudem bedeuten große Messelektrodenabstände einen drastischen Verlust des oberflächennahen Auflösungsvermögens. Daher muss bei dieser traditionellen Vorgehensweise je nach Aufgabenstellung vor Beginn der Messkampagne ein Kompromiss zwischen max. Aussagetiefe und Auflösungsvermögen gefunden werden.

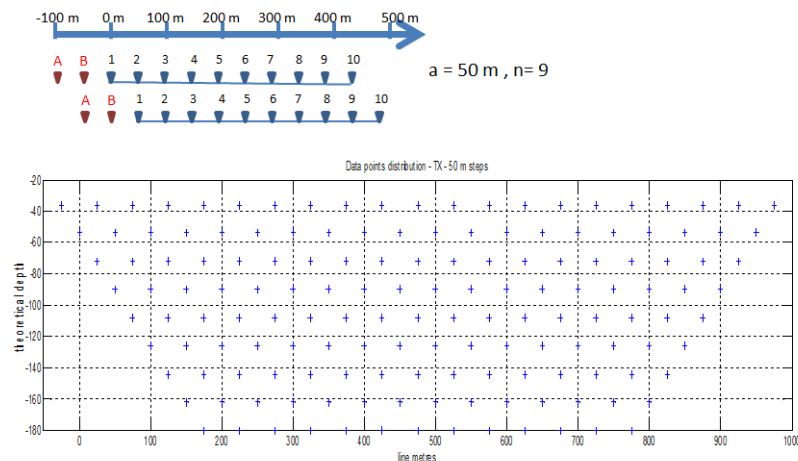


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer „klassischen“ Dipol-Dipol Messungen; das Bild zeigt die Datenverteilung eines Dipol-Dipol Surveys mit einem Elektrodenabstand von 50 m und $n = 9$ Tiefenlevels.

In Messgebieten, wo nur wenige Informationen zur Geologie vorliegen, ist die richtige Wahl des Elektrodenabstandes schwierig. Die Aufnahme von Datensätzen mit hoher oberflächennaher Auflösung und großer Aussagetiefe kann dann nur durch zeit- und kostenintensive Wiederholungsmessungen desselben Profils mit verschiedenen Elektrodenabständen erreicht werden.

Mit der Entwicklung des HIRIP (High Resolution Resistivity und IP) Systems 2006 haben wir eine Lösung geschaffen, die seitdem an die verschiedene Fragestellung angepasst und verfeinert wird.

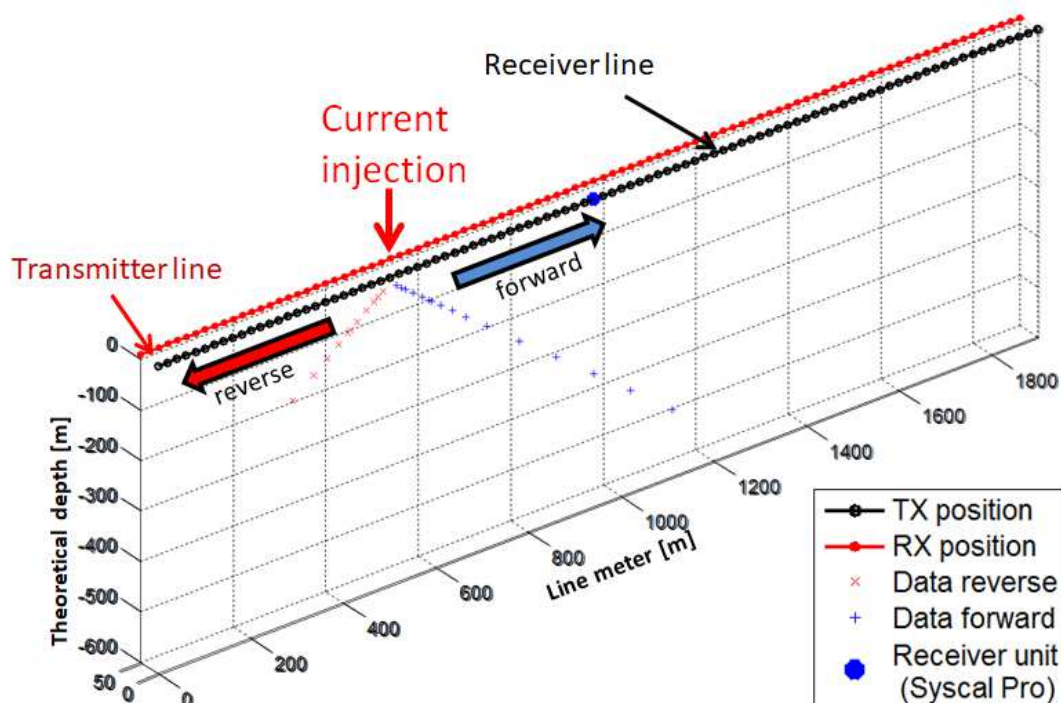


Abbildung 3: Funktionsweise des HIRIP Messsystems: Auslegen eines mehradrigen Messkabels mit einer Länge von 1900 m und einem Elektrodenabstand von 20 m. Einspeisungen von Strömen entlang eines parallel verlaufenden Profils. Durch die flexible Ansteuerung der 96 Elektroden können Vorwärts- und Rückwärtsmessung realisiert werden.

Wie in Abbildung 3 gezeigt, wird dabei zur Messung der Spannungsabfälle ein 1900 m langes Multi-Elektroden Kabel mit einem Elektrodenabstand von 20 m benutzt. Das Messkabel ist mit einer Syscal Pro 10 Kanal Apparatur der Firma Iris Instruments verbunden, die es erlaubt, mittels Sequenzen flexibel Elektrodenpaare anzusteuern. Somit können die Messungen mit Dipollängen von 20 m und der „Multiplen“ des Elektrodenabstandes durchgeführt werden. Hierdurch ist das Messsystem an jede Messbedingung im Feld, d.h. in Abhängigkeit der Übergangswiderstände, Widerstandsverteilung im Untergrund und der Stärke der eingespeisten Ströme, anpassbar. Zudem können „Vorwärts- und Rückwärtsmessung“ realisiert werden, was vor allem bei der Aufnahme von Pol-Dipol Daten sehr wichtig ist.

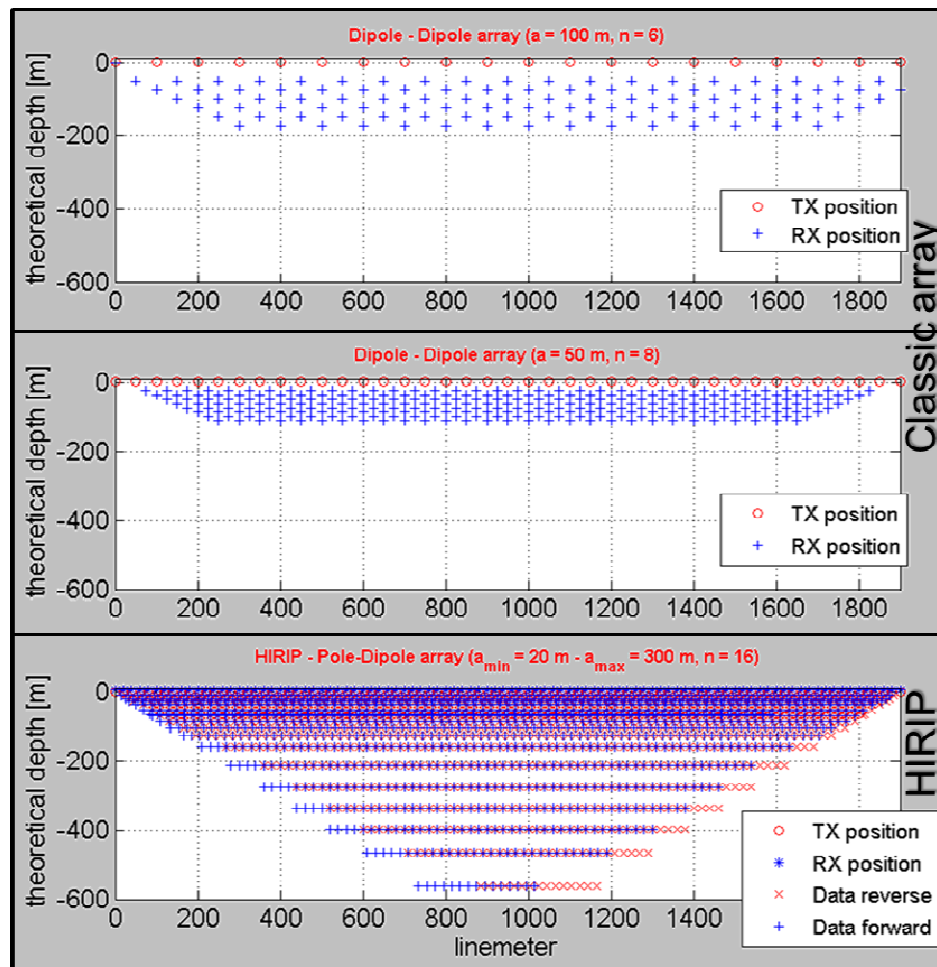


Abbildung 4: Messwertverteilung einer Dipol-Dipol Anordnung gemessen mit einem Elektrodenabstand von 50 m ($n = 1-6$) (Bild oben), einem Elektrodenabstand von 100 m ($n = 1-6$) (mittlere Bild) und dem Pol-Dipol HIRIP Messsystem (Bild unten)

Um Kopplungseffekte zu minimieren ist die räumliche Trennung von Einspeise- und Messkabel elementar. Daher erfolgt die Einspeisung der Ströme im Intervall von 40 m über ein mit 50 m Abstand zum Empfangskabel parallel verlaufendes Stromkabel (Abbildung 3). Die erforderlichen hohen Ströme werden von einem 10 KW (3200 V) Transmitter generiert.

Messkampagne Westafrika – In einer großangelegten Messkampagne in Westafrika wurde das HIRIP ERT/IP Verfahren eingesetzt, um die komplexe Geometrie einer tektonischen Grabenstruktur in einem Sedimentbecken zu erkunden und eine mit feinverteilten Sulfiden assoziierte Urananreicherung, im Bereich von Störungszonen zu detektieren. Mit einem Messelektrodenabstandes von 20 m sollten oberflächennahe Schichten aufgelöst und Störungszonen genauer abgegrenzt werden.



Abbildung 5: Das Foto zeigt die Sandsteine, die auf der nördlich Grabenschulter kartiert werden konnten.

Der etwas 1 km breite Graben war vollständig mit Sand bedeckt und bot keine Aufschlüsse. Lediglich im nördlichen und südlichen Schulterbereich des Grabens konnten Sandsteine kartiert werden (Abbildung 5 und Abbildung 7).



Abbildung 6: Impression aus dem Feld. Die Fotos zeigen die Sandbedeckung des inneren Grabens.

Messkonfiguration – Um die komplexe Grabenstruktur bis in eine Tiefe von etwa 500 m und in ihrer gesamten Breite detailliert erfassen zu können, wurden 24 Profile mit einer Länge von je 2740 m und Profilabständen von 200 m senkrecht zur Grabenachse ausgelegt. Durch die Limitierung des Messsystems auf 1900 m kam hier die roll-along Technik zur Verlängerung auf 2740 m zum Einsatz.

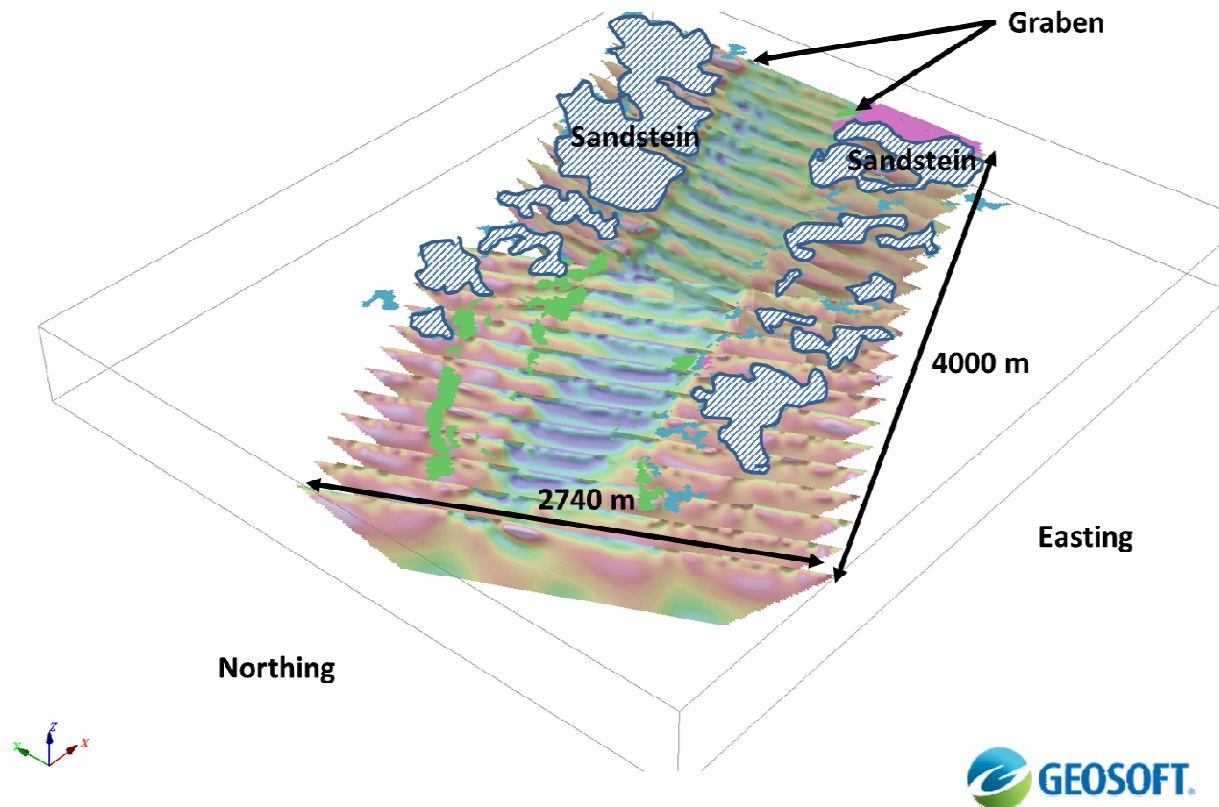


Abbildung 7: Räumlich orientierte 2D Widerstandschnitte, die zur Erfassung des Grabens gemessen wurden. Die schraffierten Bereiche zeigen die kartierten Sandsteine.

Das Einspeisesignal, erzeugt von einem 10 kW Transmitter, war ein Rechteckimpuls mit 2 s ON und 2 s OFF Zeit. Die Ankopplung der Mess- und Einspeiseelektroden auf dem sandigen Untergrund / verfestigten Sandstein war teils sehr schwierig und zeitintensiv. Auch mit mehreren hundert Litern Wasser gelang es nicht, die Übergangswiderstände aller Elektroden auf ein einheitlich niedriges Niveau zu reduzieren.

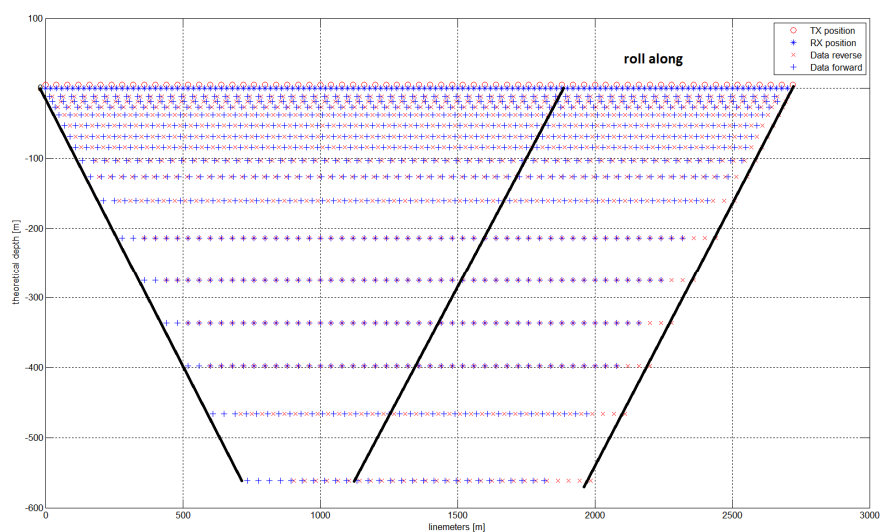


Abbildung 8: Datenverteilung eines 2740 m langen „roll-along“ Pol-Dipole HIRIP Messprofils. Der Überlappungsbereich betrug 1060 m.

Im Bereich des Grabens konnten die Werte auf 2 bis 4 k Ω reduziert werden. In den von Sandsteinen bedeckten Schulterbereichen wurden hohe Übergangswiderstände von bis zu 40 k Ω gemessen. Für die Präparation der Einspeisepunkte wurde hochkonzentriertes Salzwasser benutzt, wodurch Ströme zwischen 2 und 5 A injiziert werden konnten.

Zur Datenerfassung der etwa 3000 Messpunkte (je Messprofil) wurde die 10 Kanal Apparatur Syscal Pro von Iris Instruments benutzt, die sich über ein Kabel mit dem Transmitter synchronisierte. Das Gerät zeichnet die Abklingkurven mit Hilfe von 20 Zeitfenstern á 80 ms auf. Als Messkonfiguration wurde Pol-Dipol gewählt. Die Messkonfiguration ist aufgrund ihrer guten Sensitivität in horizontaler Richtung bestens für die Detektion von Störungzonen geeignet. Bei der hier benutzten Kabelauslage hätte, der Theorie folgend, der Remote Pole in einer Entfernung von mindestens 10 km installiert werden müssen. In der Praxis ist das allerdings oft aus sicherheitstechnischen und logistischen Gründen nicht umsetzbar. In der Regel wird die entfernte Stromelektrode in etwa 3000 m bis 3500 m seitlich zum Profil präpariert. Die Position des Injektionspunktes wird eingemessen und später bei der Inversion der Messdaten mit berücksichtigt.

Das in diesem Messgebiet niedrige Widerstandsniveau und die mit zunehmender Tiefe abnehmenden Messamplituden stellten für die Aufnahme von sauberen Transienten eine große Herausforderung dar. Die Messung stabiler Widerstandsdaten findet bei aktiver Stromeinspeisung statt und ist selbst bei geringen Spannungsabfällen unproblematisch. Sinkt die sogenannte primäre Spannung auf Werte unter 2 mV, ist die Aufzeichnung der Entladungskurve schwierig. Die Abklingkurven sehen dann oft verrauscht aus, was vor allem auf die stark variierenden Übergangswiderstände der zur Messung benutzten Elektroden zurückzuführen ist. Da die Einspeisung höherer Ströme nicht möglich war, konnte eine Erhöhung der Signalstärke nur durch die Anpassung der Messelektrodenabstände erreicht werden.

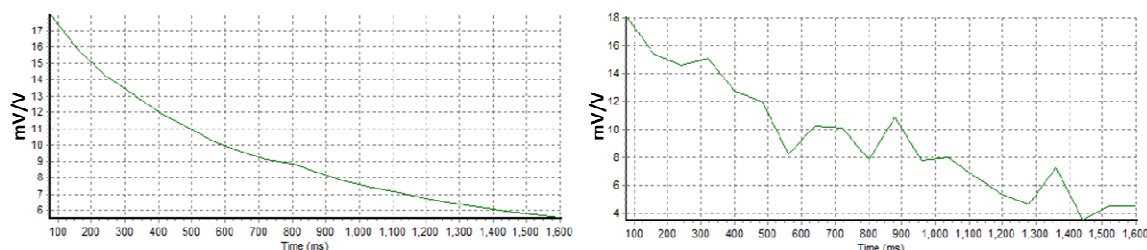


Abbildung 9: Die beiden Grafiken zeigen exemplarisch zwei Abklingkurven, die mit der Syscal Pro aufgezeichnet wurden (Software: Prosys II – Iris Instruments). Die primäre Spannung der linken Kurve betrug 60 mV, die der rechten Kurve 2.5 mV.

Bei der Bearbeitung der Daten werden zunächst Ausreißer und Daten mit hoher Standardabweichung aus dem Datensatz entfernt. Ein Ansatz, um die Qualität der Transienten zu bestimmen, ist die Durchführung einer exponentiellen Regressionsanalyse. Anhand der bestimmten Regressionskoeffizienten können dann IP Daten mit „unruhigen“ Abklingverhalten herausgefiltert werden. Aufgrund der hohen Datendichte, die mit dem HIRIP System erreicht wird, stellt der Verlust von ein paar Dutzend Datenpunkten kein Problem dar.

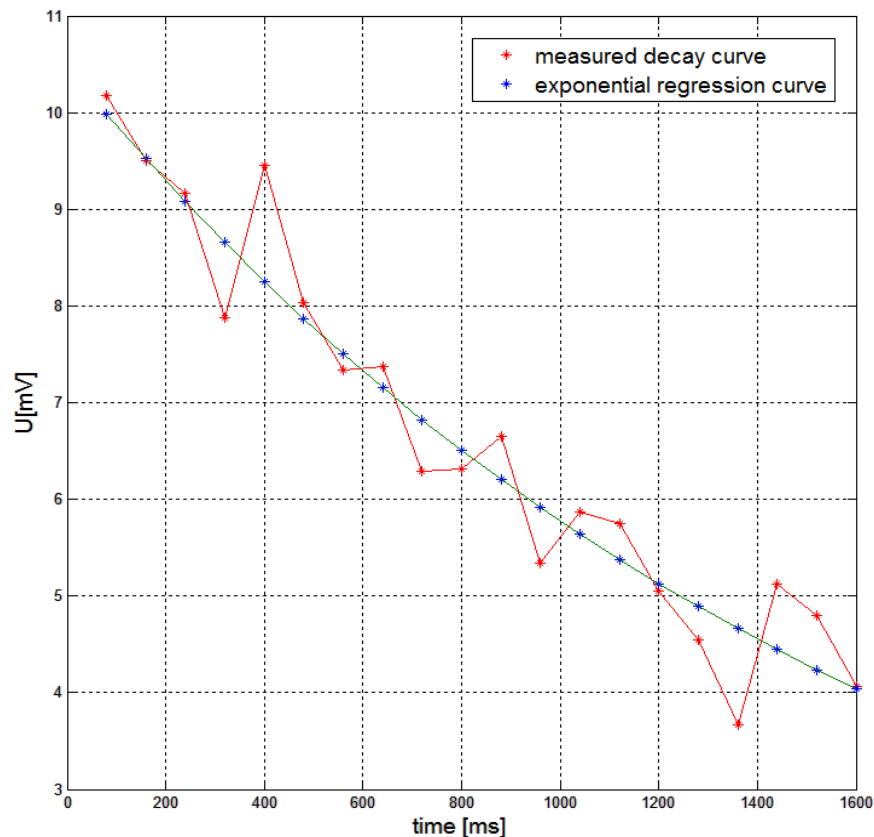


Abbildung 10: Gemessene Abklingkurve (rot) und die dazu berechnete Regressionskurve (blau).

Für die Modellierung wurde die 2D Inversionssoftware ZondRes2d (<http://zond-geo.com/english/zond-software/ert-and-ves/zondres2d/>) benutzt. Das Programm erlaubt die Benutzung von dreidimensionalen Positionen. Durch die Projektion der Relativpositionen des Remote Pols bzw. der Injektionspunkte auf die Messlinie und der Anpassung der Geometriefaktoren wird der als 2.5 D gemessene Survey in ein zweidimensionales Problem überführt. Aufgrund fehlender A-priori-Informationen wurde für die Inversionen (Occam) der scheinbaren spezifischen Widerstände und Aufladbarkeiten homogene Startmodelle benutzt. Durch den geringen Messprofilabstand von 200 m waren charakteristische Anomalien in den Widerständen und Aufladbarkeiten benachbarter Modellsektionen gut miteinander korrelierbar. Durch die intensive Zusammenarbeit mit den Geologen vor Ort konnten in mehreren Modellierungszyklen die geophysikalischen Modellierungsparameter angepasst und ein komplexes geologisches Modell entwickelt und Schritt für Schritt verfeinert werden.

Interpretation der Messdaten - Das relative Widerstandsniveau bzw. der gemessene Widerstandsbereich im Untersuchungsgebiet ist mit Werten zwischen 10 Ωm und maximal 600 Ωm recht gering. Dennoch lassen sich die Lithologien auf Grund starker Kontraste im spezifischen Widerstand gut voneinander abgrenzen. Der Graben ist auf Grund der tonigen Grabenfüllung mit geringen Widerständen zwischen 5 Ωm und etwa 50 Ωm gut zu erkennen. Die Grabenschultern südlich und nördlich des Grabens zeigen einen ähnlichen Aufbau. Ausgehend von der Oberfläche sieht man eine Wechsellagerung von Schichten mit mittleren und hohen Widerständen, die Sandsteinen und verwitterten vulkanischen Gesteinen zugeordnet werden konnten.

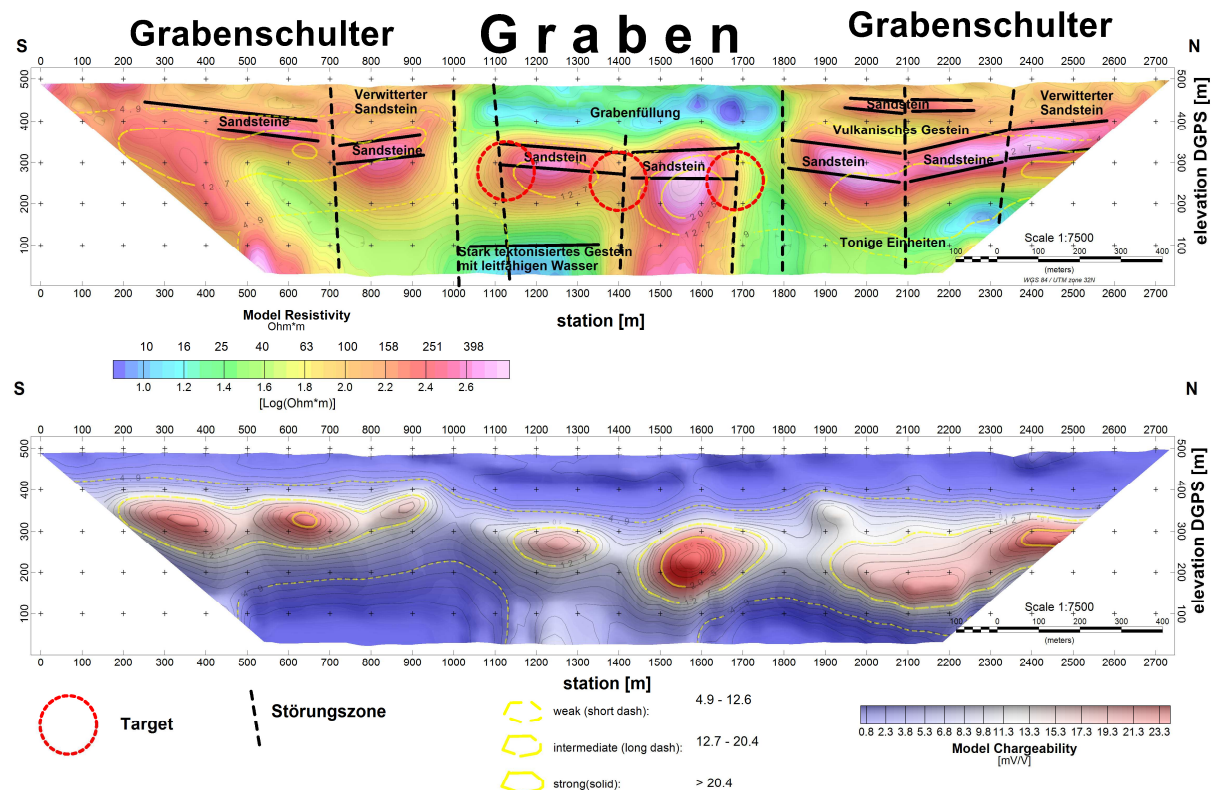


Abbildung 11: Geoelektrischer / TDIP-Profileschnitt mit Interpretation.

Die niederohmige Schicht in etwa 400 m Tiefe wurde als tonige Einheit interpretiert. Auffällig ist, dass der oberflächennahe Sandstein südlich des Grabens nicht detektiert werden konnte, was durch eine stärkere Verwitterung erklärt wird. Diskontinuitäten in den Schichtungen und schmale subvertikale oder vertikale Widerstandsminima werden als Störungszone interpretiert.

Bereiche mit erhöhten Aufladbarkeiten deuten auf primäre sulfidische Vererzungen (assoziiert mit Urananreicherung) hin, die entlang von Störungszone mobilisiert bzw. sekundär weiter angereichert wurden. Störungszone, in oder in deren Nähe sulfidische Vererzung detektiert wurden stellen daher potentielle Uran-höfliche Bereiche dar. Die in Abbildung 11 (oben) rot eingekreisten Bereiche kennzeichnen die empfohlenen Bohrziele.

In diesem Untersuchungsgebiet wurden bisher keine Bohrungen abgeteuft. Jedoch wurde das geophysikalische Modell durch Bohrungen mit angeschnittenen Vererzungen im unmittelbar angrenzenden Messgebiet bestätigt.

Fazit – Für die Erkundung einer Uranlagerstätte innerhalb einer Grabenstruktur wurden hochauflösende ERT und Zeitbereichs IP Messungen bis zu einer Tiefe von 500 m durchgeführt. Aufgrund ihrer Assoziation mit der sulfidischen Mineralisation, konnte die IP Methode zur Lokalisierung der Urananreicherungen eingesetzt werden. Infolgedessen konnten primäre sulfidische Vererzung detektiert werden. Mit Hilfe der ERT Messungen war es möglich die komplexe Geometrie der Grabenstruktur abzubilden und in enger Zusammenarbeit mit den Geologen ein detailliertes geologisches Model zu erstellen. Bei der Festlegung der Bohrziele waren Bereiche priorisiert, in denen primäre Vererzung entlang von Störungszonen mobilisiert bzw. sekundär angereicht wurden.

Literatur

- Gurin, G., Titov, K., Ilyin, Yu., & Tarasov, A., 2015, Induced polarization of disseminated electronically conductive minerals: a semi-empirical model, *Geophysical Journal International* 200, 1555 – 1565.
- Nordsiek, S. & Weller, A. (2008) A new approach to fitting induced-polarization spectra. *Geophysics* 73(6), F235 – F245.
- Pelton, W.H., Ward, S.H., Hallof, P.G., Sill, W.R. & Nelson, P.H. (1978) Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics* 43, 588–609.

Anwendungen der Induzierten Polarisierung in der Archäologischen Prospektion

Burkart Ullrich(1), Rudolf Kniess(1), Carsten Rücker(2), Rouven Turck(3)

(1) Eastern Atlas GmbH & Co. KG
Berliner Str. 69
D-13189 Berlin
E-Mail: b.ullrich@eastern-atlas.com, k.kniess@eastern-atlas.com

(2) Technische Universität Berlin
Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachgebiet Angewandte Geophysik
Ernst-Reuter-Platz 1
D-10587 Berlin
E-Mail: carsten.ruecker@tu-berlin.de

(3) Universität Zürich
Institut für Archäologien, Fachbereich Prähistorische Archäologie
Karl Schmid-Strasse 4
CH-8006 Zürich
E-Mail: rouven.turck@uzh.ch

1. Archäologische Prospektion

Die Methode der Induzierten Polarisierung (IP) wird in der archäo-geophysikalischen Prospektion (AP) auch 15 Jahre nach grundlegenden Arbeiten (Weller 2003, Schleifer 2004) nach wie vor kaum verwendet. Standardverfahren in der AP sind die magnetische Kartierung (MAG) und das Georadar (GPR), da sie oberflächennahe archäologische Strukturen in der Fläche deutlich effektiver und mit höherer Auflösung abgrenzen können. Gleichstromgeoelektrische Messungen stellten zwar die erste Anwendung geophysikalischer Methoden zur Untersuchung archäologischer Strukturen dar (Atkinson 1952). Und mit der Verfügbarkeit von Multielektrodenapparaturen und Inversionsprogrammen werden 2D und 3D-Widerstandselektrik auch verstärkt zur Erkundung von archäologischen Strukturen genutzt. Für die Prospektion archäologischer Befunde kommt die (Gleichstrom-) Geoelektrik aber erst zum Einsatz, wenn die anderen Methoden (MAG, GPR) an ihre Grenzen kommen, z.B. eine Erkundungstiefe von mehreren Metern gefordert ist oder/und die elektrische Leitfähigkeit (bzw. der Widerstand) zur Erkennung archäologischer Befunde und Strukturen besser geeignet ist als magnetische und dielektrische Parameter. Die IP-Methode kommt als Spezialisierung nochmals deutlich seltener als gleichstromgeoelektrische Untersuchungen zum Einsatz, auch wenn ihr Potential für die archäologische Prospektion bereits vor über 50 Jahren angedeutet wurde (Aspinall et al 1968). Die Anwendungen der IP zielen auf die folgenden drei, teils übergreifenden Fragestellungen:

- 1) Strukturen und Befunde aus Holz als schwach polarisierbare Medien,
- 2) Archäometallurgische Befunde als stark polarisierbare Medien sowie
- 3) Landschaftsarchäologische Fragestellungen.

Der Forschungsstand wird nachfolgend kurz diskutiert und die Möglichkeiten und Grenzen der IP-Methode anhand von Beispielen archäo-geophysikalischer Prospektionen erläutert.

2. Messtechnik

Wesentlich für die Aussagekraft von IP-Messungen ist die Qualität der Messung des komplexen elektrischen Widerstandes, die u.a. von dem verfügbaren IP-Messgerät und der Art der verwendeten Elektroden abhängt. In den meisten publizierten Beispielen wurden für IP-Anwendungen konzipierte Geräte für Messungen im Frequenzbereich verwendet (SIP-Fuchs von Radic-Research, Phoenix V5 von Phoenix Geophysics, GeoTom-MK-IP von GeoLog).

Für die Messungen im Oberhalbstein (Beispiel im Kapitel 5) wurde die 4-Punkt Light von LGM eingesetzt. Der Empfänger des Gerätes nimmt die Phasenverschiebung zwischen dem Ausgangsstrom und der Spannung als „Außer-Phase“-Spannung U_{90} auf. Diese liegt etwa zwei bis drei Größenordnungen unter der „In-Phase“-Spannung U_0 . Das Verhältnis U_{90}/U_0 (multipliziert mit 1000, Einheit mrad, $1 \text{ mrad} = 0,0572 \text{ Grad}$) ist ein direktes Maß für die Phasenverschiebung und somit für die induzierte Polarisation des Bodens (Lippmann, 2012).

Mit der Entwicklung der Multielektrodenapparaturen liegt auch bei Anwendungen in der AP der Fokus auf der Gewinnung großer Datensätze für die Modellierung der Widerstandsverteilung. Die hohe Anzahl einzelner Messungen wird durch schnelles Umsetzen der Elektroden bzw. Kabel erzielt. Unpolarisierbare Elektroden, die in der ersten Phase systematischer Forschung für Anwendungen in der AP den Standard darstellten, werden heute meist nicht mehr verwendet. Die Aussagekraft der IP-Messergebnisse ist daher vielfach nur qualitativ. Dies erklärt vermutlich auch, warum nur selten IP-Messdaten gezeigt werden, obwohl fast alle verfügbaren Apparaturen messtechnisch dafür ausgelegt sind.

3. Holzbefunde

Die Membranpolarisation in erhaltenden Holzstrukturen ist Ansatzpunkt für die Anwendung der IP-Methode für den indirekten Nachweis von Holz im Boden. Holz als Baumaterial wurde in größeren Umfang vielfach in frühzeitlichen Befestigungsanlagen als sog. Holz-Erde-Architektur verwendet. Auch für Bestattungen in Grabhügeln werden massive Hölzer zur Konstruktionen von Grabkammern und für Särge genutzt. Gute Erhaltungsbedingungen für organische Substanz sind u.a. bei geringen Sauerstoffgehalt im feuchten Boden und im Wasser gegeben sowie im stark sauren Milieu von Mooren. Unter diesen Bedingungen ist der alternative Einsatz der Elektromagnetik und Georadar aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit im Boden nicht zielführend. Die alternative Anwendung der IP-Methode in der Feuchtbodenarchäologie war daher Gegenstand systematischer Untersuchungen im Feld- und Labormaßstab (Weller et al 2006, Schleifer 2004).

Die Ergebnisse von SIP-Messungen an Erlen- und Eschenholzproben eines freigelegten Bohlenweges im Federseemoor zeigen deutlich Phasenmaxima von 50 bis 70 mrad bei etwa 3 bis 5 Hz (Schleifer et al 2002). Durch Vergleich der Messergebnisse in axiale und radiale Richtung wird zudem die anisotrope Holzstruktur als Ursache für die Polarisierungseffekte deutlich. Feldmessungen über diesen, etwa 0,9 m tief liegenden Bohlenweg mit Frequenzen zwischen 1 und 60 Hz zeigten aber deutliche geringe Effekte unterhalb von 10 mrad. In der Nähe ausgegrabener römischer Boote wurden IP-Effekte durch Zeitbereichsmessungen beobachtet (Finzi-Contini, 2001, Losito et al 2001). Das für die Erfassung des IP-Effektes schwach polarisierbarer Medien nicht notwendigerweise der Einsatz unpolarisierbarer Elektroden erforderlich ist, zeigen vergleichende Untersuchungen zur Auswahl der Elektroden für Messungen mit der SIP-256 (Schleifer 2004).

Beispiel: Prospektion am mittelalterlichen Heidenwall bei Oldenburg

Der befestigte, sog. Heidenwall liegt an einem Übergang über die Hunte und wurde im Zuge einer Rettungsgrabung im Jahr 2007 archäologisch untersucht (Fries 2007). Die Grabungen legten u.a. hervorragend erhaltene Holzstrukturen überwiegend aus Erle (ca. 61%) und Eiche (32%), frei, die dendrochronologisch auf 1032 bis 1042 n. Chr. datiert wurden (Fries 2008). Während etwa 1/3 des Ringwalles freigelegt war (Abbildung 1, links unten) konnten IP-Messungen entlang eines Profils über den noch nicht ergrabenen Teil ausgeführt werden (Apparatur GeoTom-MK-IP, Konfiguration: Wenner- α , Elektrodenabstand 1 m). Das Ergebnis der Profilmessung mit Stahlelektroden zeigt zwar leicht erhöhte Phasenwerte für die Messung bei 4 Hz im Profilabschnitt von etwa 68 bis 79 m (Abbildung 1, oben), die aber nicht sicher von Kopplungs- und anderen Messeffekten getrennt werden können. Das Widerstands-Tiefenmodell zeigt im Vergleich mit dem Grabungsergebnis eine gute Übereinstimmung für die Amplitude des Widerstandes mit den später ergrabenen Holzkonstruktionen und einem Altarm der Hunte. Das Beispiel zeigt die Grenzen der IP-Methode für Feldmessungen, wenn die Holzbefunde unter einer Bedeckung, hier bis 3 m mächtige Aufschüttungen, liegen.

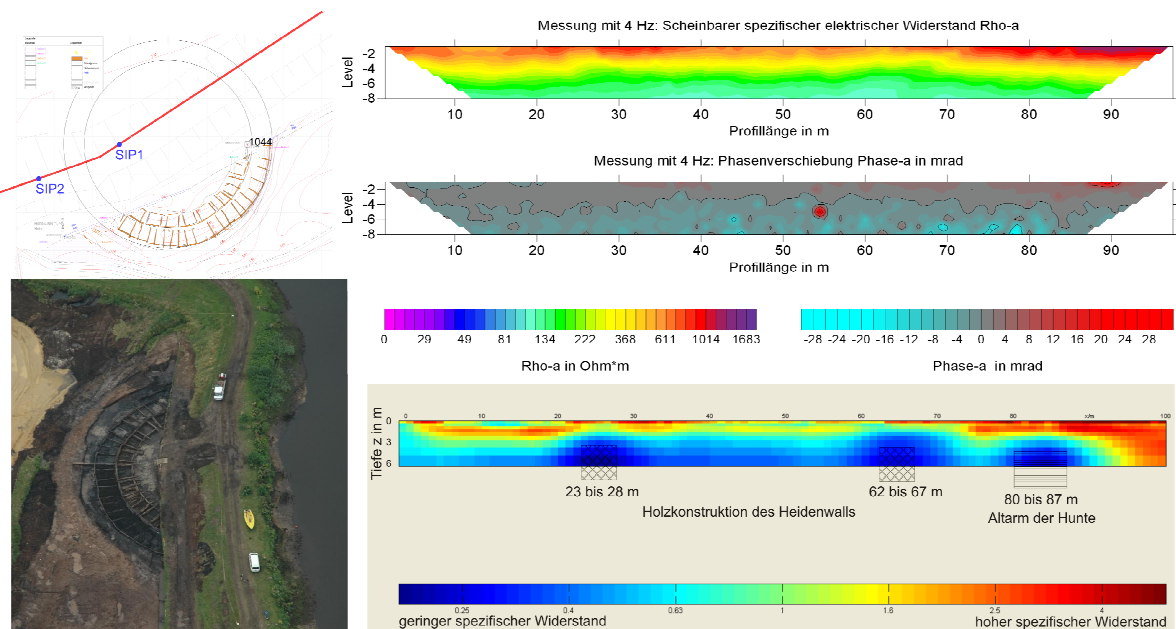


Abbildung 1: Lageplan und Luftbild (links) der teilweise ausgegrabenen Wallanlage mit Holzkonstruktion. Pseudosektionen der Messung des scheinbaren Widerstandes und der Phase (oben) sowie das Widerstandsmodell mit Interpretation (unten), Luftbild und Lageplan: Arcontor.

4. Archäometallurgische Befunde als stark polarisierbare Medien

Die klassische Anwendung der IP-Methode in der archäo-geophysikalischen Prospektion zielt auf die Erkundung archäometallurgischer Befunde als Residuen der Prozesskette *Chaîne opératoire* (Abbildung 2, links, Ottaway 1994). Die Nutzung und Verarbeitung unterschiedlicher Roh- und Zuschlagstoffe über die Zeit auf meist engem Raum resultiert vielfach in sehr komplexen archäologischen Fundstellen. Für die geophysikalische Vorerkundung dieser Fundstellen stellen die hohen zu erwartenden Kontraste in den petrophysikalischen Parametern prinzipiell günstige Voraussetzungen dar. Da das Magnetfeld aufgrund der meist starken remanenten Magnetisierung der Befunde vielfach sehr hohe und ausgedehnte Amplituden aufweist, sind elektrische Messungen (und Radarmessungen) gut für die weitergehende Detailerkundung geeignet. Da die Ausdehnung der Befunde durch elektrische Messungen nicht nur an der Oberfläche, sondern auch in der Tiefe erfasst werden kann, sind damit auch quantitative Aussagen möglich.

Schlacken als Abfallprodukt des Verhüttungsprozesses bleiben als Rückstände in Form von Halden vielfach vollständig erhalten. Ihre nähere Erkundung nach Lage und Tiefe sowie die Quantifizierung des Haldenvolumens ist eine der Hauptanwendungen der IP in der AP. So gelang in der römischen Stadt Munigua, Sierra Morena, Andalusien, Spanien eine Abschätzung des Haldenvolumens von Kupfer- und Eisenschlacken auf Basis von 3D-Modellen des komplexen Widerstandes (Ullrich et al, 2007). 2D-SIP-Messungen an Proben und flachen Schlackenablagerungen in Castel-Minier, Ariège, Frankreich ermöglichten die Abschätzung der mittelalterlichen Eisenproduktion (Florsch et al, 2010). Das Beispiel Ain-al Hajer, Marokko zeigt die Grenzen der Modellierung für große und komplexe Schlackenhalde mit komplizierter Topografie, wenn IP-Effekte des Haldenmaterials von anderen Effekten nicht sicher getrennt werden können (Ullrich et al, 2009).

Neben den Schlackenhalde sind die Öfen Ziel archäo-geophysikalischer Vorerkundungen, da sie Aussagen zur technologischen Entwicklung der Produktion ermöglichen. Für die Ortung von Verhüttungsöfen (bzw. Öfen allgemein) wird die Magnetprospektion als Übersichtsmessung eingesetzt. Da aber auch Erze und Schlackenrückstände typischerweise magnetische Anomalien mit sehr hohen Amplituden erzeugen, kann die IP-Methode zur weiteren Differenzierung der archäometallurgischen Befunde auf Werkplätzen beitragen. Die Kombination der Methoden Magnetik und DC-Elektrik wurde in Meroe, Sudan zur Untersuchung von Halden eingesetzt (Humphries et al.), Magnetik und IP-Elektrik wurde zur Ansprache von Schlackenplätzen im Pandelbachtal, Harz (Weller 2003) und zur Ortung von möglichen Öfen in Schlackenhalde in Meroe, Sudan (Ullrich et al, 2014) genutzt.

Beispiel: Prospektion am Schlackenplatz 72 „Wildersee“ am Mitterberg, Tirol

Das Mitterberg-Revier in der Bergbauregion Salzachpongau war ein wichtiger Kupferlieferant in der Bronzezeit. Die ersten prähistorischen Funde wurden mit der Wiedererschließung der Lagerstätte um 1828 gemacht (Stöllner, et al 2011). Gegenstand der Forschungen sind sowohl ober- als auch untertägige Spuren des bronzezeitlichen Bergbaus. Als geophysikalische Prospektionsmethoden werden die Magnetik zur Flächenerkundung (Stöllner et al 2011) und die 2D-Geoelektrik zur Tiefenerkundung (Herd 2009) eingesetzt. In einer Pilotstudie am Verhüttungsplatz SP72 Wildersee wurden diese Methoden kombiniert. In den magnetischen Daten sind das Röstbett und mögliche Öfen oder Aufbereitungsgruben der *Chaîne opératoire* gut erkennbar (Abbildung 2, unten links). Die Schlackenhalde sind in den magnetischen Daten nicht eindeutig von möglichen Gruben oder Ofenresten unterscheidbar, aber zum Teil als Bewuchsmerkmal im Gelände erkennbar (Abbildung 2, Foto). Die Ergebnisse von IP-Messungen (Apparatur GeoTom-MK-IP, Edelstahl Elektroden, Abstand 0,5 m; Konfiguration Wenner- α , Hin und Rückmessung) auf zwei ausgewählten Profilen P01 und P10 erlauben die Abgrenzung der Schlacken anhand von IP-Werten größer 10 mrad. (Abbildung 2, rechts). Die erhöhten IP-Werte korrelieren hier nicht generell mit den höchsten Werten für die magnetische Suszeptibilität, was auf unterschiedliche Materialeigenschaften. Im Vergleich mit Bohrsondierungen (mündliche Mitteilung Erica Hanning.) zeigte sich, dass die modellierten Tiefen (AC2DInvRes, A. Weller) deutlich größer sind, als die erbohrten Mächtigkeiten der Aufbereitungshalde, die zwischen 5 und 25 cm variieren.

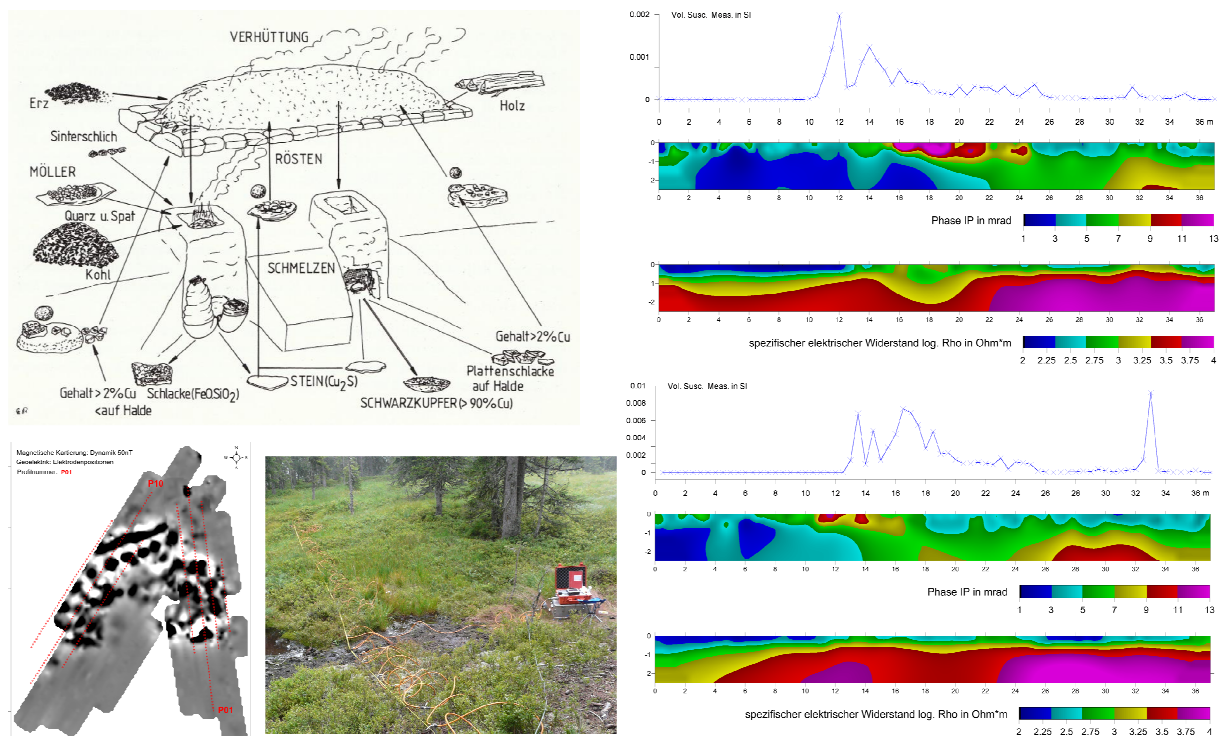


Abbildung 2: Die Prozesskette - *Chaîne opératoire*- für den prähistorischen Bergbau in den Ostalpen (nach Ottaway 1994) sowie deren Spuren im Abbild magnetischer Messungen (u.l.) und 2D-IP-Profilmessungen (rechts) am Schlackenplatz SP72 Wildersee am Mitterberg.

5. Landschaftsarchäologie

Landschaftsarchäologische Fragestellungen zielen neben dem archäologischen Befund auch auf die Umgebung und deren Entwicklung durch natürliche oder anthropogene Veränderungen. Die größere Skala der Untersuchungen drückt sich in der AP durch großflächige Kartierungen und Untersuchungen mit größerer Erkundungstiefe aus. In beiden Techniken kommt die IP-Methode zur Anwendung.

Für die Kartierung großer Flächen stehen heute mobile Mehrkanalsysteme mit GNSS-Positionierung zur Verfügung. Während erste Anwendungen dieser Technik allein auf den Widerstand abzielen (Dabas et al 1994, Panissod et al 1998) werden heute auch IP und SIP-Apparaturen zur Messung des komplexen Widerstandes mittels galvanischer Ankopplung durch rollende Elektroden genutzt (Lück et al 2009). Die Ergebnisse einer Pilot-Studie mit dem Systems des IGZ Großbeeren, ausgestattet mit einer SIP-Fuchs auf dem Vorburggelände des Burgwalls Lossow weisen auf unterschiedlichen Feinkornanteil und Durchfeuchtung des Geschiebemergels anhand des spezifischen Widerstands (Ullrich et al 2013). Die Unterscheidung der Bodentypen erlaubt Rückschlüsse auf die Siedlungsaktivität in den untersuchten Arealen, die Verteilung der Phasenwerte wurde hierzu aber nicht verwendet.

Eine größere Erkundungstiefe wird bei geoelektrischen Messungen durch große Aufstellungsweiten erreicht, was zum Teil mit einem größerem Elektrodenabstand von mehreren Metern einhergeht. Die Zielstellung dieser Untersuchungen ist die Erfassung geologischer Schichten bzw. Körper. In der montanarchäologischen Forschung kommt die IP-Methode zur Erkundung prähistorischer Bergbauspuren zur Anwendung. Im o.g. Forschungsprojekt am Mitterberg (Stöllner et al 2011) wurden durch die BTU Cottbus geoelektrische Profilmessungen längs von Pingenzügen durchgeführt (Apparatur Syscal R1-Plus Switch48 von IRIS Instruments, Elektrodenabstände zwischen 2,5 und 10 m, Fritz 2010). Die abgeleiteten 2D-Modelle des Widerstandes (Res2DInv) zeigen Indikationen zu bekannten untertägigen Hohlräumen und obertägigen Pingeneinbrüchen; die ebenfalls modellierte Chargeability wurde aber auch hier nicht für eine weitergehende Interpretation herangezogen.

Beispiel: Prospektion am Fundplatz Gruba II im Oberhalbstein, Graubünden, Schweiz

Im Forschungsprojekt zum prähistorischen Kupferbergbau im Oberhalbstein (Turck et al. 2014) wurden am Fundplatz Gruba II (Turck et al. 2018) Georadar- und geoelektrische Messungen zur Untersuchung kleinteiliger Abbauflächen durchgeführt. Am Fundplatz weist eine Pingenzug über etwa 150 m Länge und 30-40 m Breite (Abbildung 3, oben links) auf den Abbau von Kupfervererzungen (Pyrrhotin und Chalkopyrit) in einer Serpentinittmasse hin (Dietrich, 1972). Erste Untersuchungen durch 2D-Profile quer zum Pingenzug (Apparatur: 4-Punkt-Light hp, Elektrodenabstand 1 m, Konfiguration Wenner- α , Frequenz 1Hz) zeigen deutliche laterale und vertikale Kontraste in beiden Messparametern (Abbildung 3, links), die eine Abgrenzung von Festgestein, Haldenmaterial und möglichen Vererzungen anzeigen.

Auf dem oberen Plateau des Pingenzugs hatten Radarmessungen auf eine Inhomogenität hingewiesen, die Ziel einer 3D-Tomografie war. Hier wurde eine Schar sich kreuzender Profile (Profilabstand 1 m, Elektrodenabstand 0,5 m, Konfiguration Wenner- α) gemessen und ein 3D-Modell der Widerstandsverteilung berechnet. Das 3D-Modell zeigt erhöhte Widerstände für eine langgestreckte, SSW-ONO ausgerichtete Struktur (Abbildung 3, Blockbild). Dies entspricht der Lage der vererzten Horizonte, deren Streichen mit etwa 60-80° E durch den Verlauf der alten Stollen bekannt ist. In Horizontalschnitten für Höhe 1864 m, (Abbildung 3, unten rechts) entspricht die Zone hoher Widerstände (links) geringen IP-Werten (rechts). Die Projektion der Radaranomalie (schwarze Schraffur) liegt auf der Grenzfläche, was möglicherweise mit dem Einfallen der Schichten mit 50-60° nach Nordosten erklärt werden kann. Ob die erfassten Widerstands- und IP-Anomalien tatsächlich durch einen Stollen bzw. abgebaute Vererzungen verursacht sind, müssen zukünftige Forschungen am Fundplatz Gruba II überprüfen.

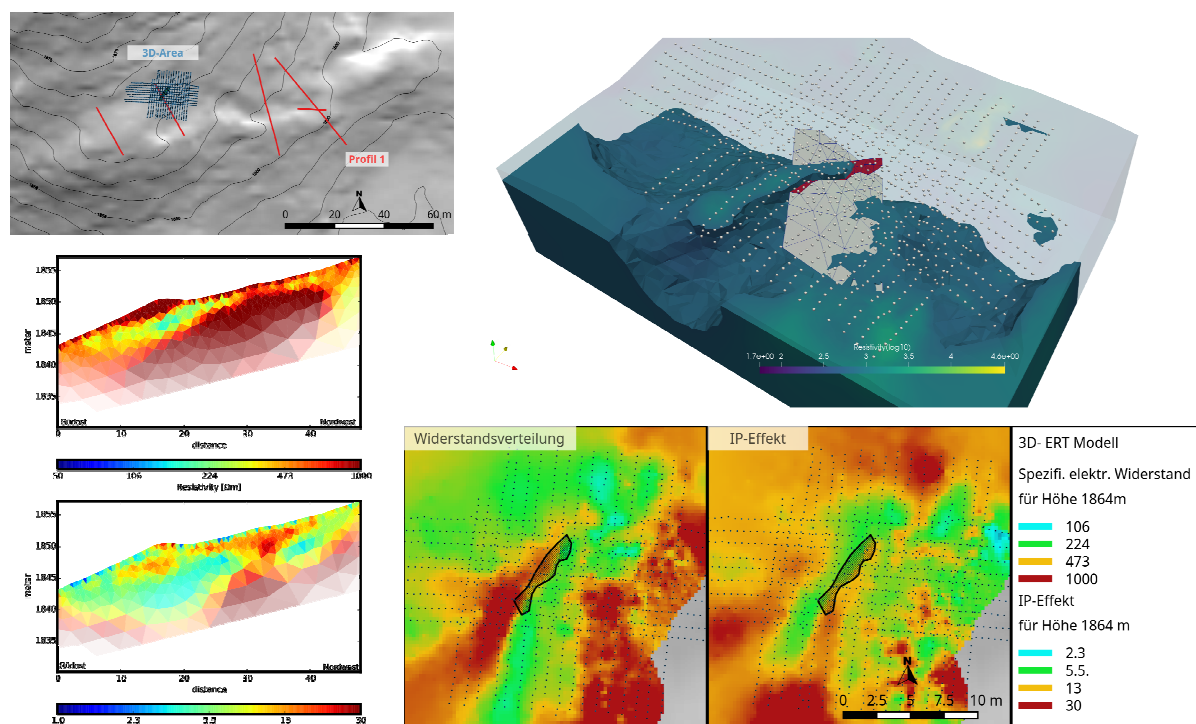


Abbildung 3: Lageplan des Ost-West-gerichteten Pingenzugs am Fundplatz Gruba II (oben, links) und die Ergebnisse als 2D-Modell für Profil 1 (links) sowie für die 3D-Fläche als Blockbild des Widerstandes und Horizontalschnitte für Widerstand und IP-Effekt für Tiefe von 2 m unter Gelände.

6. Zusammenfassung und Perspektiven

Die gezeigten Beispiele verdeutlichen die Möglichkeiten aber auch die Grenzen der IP-Methode für Feldmessungen bei Verwendung von Edelstahlelektroden. Zur Erkundung archäologischer Befunde, insbesondere für schwach polarisierbare Medien (Holz) sind Messungen mit unpolarisierbaren Elektroden zu empfehlen. Die Beispiele aus der Archäometallurgie bzw. Montanarchäologie zeigen, dass Schwierigkeiten bei der Interpretation der Phasenverteilung durch Kombination mit den Ergebnissen anderer Prospektionsmethoden teilweise überwunden werden können.

Um die Methode der Induzierten Polarisation in der archäologischen Prospektion zu etablieren sind systematische Forschungen und technische Entwicklungen erforderlich. Für systematische Forschung bieten sich montanarchäologische Projekte an. Diese integrieren bereits standardmäßig mineralogische und materialwissenschaftliche Untersuchungsmethoden, über die ein Bezug zu den petrophysikalischen Eigenschaften der Befunde und Böden hergestellt werden kann.

Technische Entwicklungen könnten auf den verstärkten Einsatz der IP für eine großflächige Kartierung mit mobilen ERT-Geräten abzielen. In Kombination mit anderen Verfahren steht mit dem IP-Effekt ein zusätzlicher Parameter zur Verfügung der für Analysen geophysikalischer Daten (Freibothe et al 2011) bzw. geophysikalischer und Fernerkundungsdaten (Kvamme 2006) zur Erfassung und Beschreibung archäologischer Strukturen und Befunde beitragen kann.

7. Literaturangaben

Atkinson, R. J. C.: Methodes electriques de prospection en archaeologie. La decouvert de Passe, 1952

Dabas, M., Decriaud, J.-P., Ducomet, G., Hesse, A., Jolivet, A., Munier, A., Tabbagh, A.: Continuous recording of resistivity with towed arrays. *Revue d'Archaometrie*, 18, 1994

Dietrich, V.: Die sulfidischen Vererzungen in den Oberhalbsteiner Serpentiniten. In: BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ, Geotechnische Serie, Lieferung 49, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1972

Eastern Atlas, Bericht Nr. 0805 Geophysikalische Untersuchungen am Heidenwall in Oldenburg, 2008, unpubliziert

Eastern Atlas, Bericht Nr. 1124 Geophysikalischen Untersuchungen am Schlackenplatz 52 "Wildersee" im Bergbaurevier Mitterberg, Österreich. 2011, unpubliziert

Eastern Atlas, Bericht Nr. 1608 Geophysikalischen Untersuchungen im Oberhalbstein, Schweiz. 2016, unpubliziert

Finzi-Contini, G.: Resistivity/IP tomographies near ancient boats embedded and preserved by fluvial sediments in an undiscovered ancient harbour, Pisa (Italy). Proceedings of the 7th Meeting Environmental and Engineering Geophysics (EEGS-ES), Birmingham-England, 2001

Florsch, N., Llubes, M., Téreygeol, F., Ghorbani, A., Roblet, P.: Quantification of slag heap volumes and masses through the use of induced polarization: application to the Castel-Minier site. *Journal of Archaeological Science*, 2010

Freibothe, R., Ullrich, B., Beilke-Voigt, I., Kaufmann, G., Kirsch, R.: Multigeophysikalische Prospektion am Burgwall Lossow. DGG-Mitteilungen, 2011

Fries, J. E., 2008: Burg zwischen Fluss und Moor: Der Oldenburger "Heidenwall". Archäologie in Niedersachsen 11, 2008

Fries, J. E., 2007: Der "Heidenwall", eine Burganlage des 11. Jahrhunderts: eine Rettungsgrabung als Beitrag zur Oldenburger Stadtgeschichte. Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen 27, 2007

Fritz, S.: Geophysikalische Untersuchungen von prähistorischen Kupferpingenzügen mit Hilfe von geoelektrischen widerstandstomographischen Verfahren im Nord- und Südevier von Mitterberg (Österreich), Bc.-Thesis, BTU Cottbus, 2010, unpubliziert

Hanning, E., Ergebnisse bodenkundlicher archäologische Prospektionen am SP72 Widersee, unpubliziert

Herd, R.: Geoelektrische Untersuchungen (2D-Tomographie) eines NW-SO gerichteten Pingenzuges im Bereich des Brandnerganges. In Stöllner 2009

Humphries, J., Carey, Ch.: New methods for investigating slag heaps: Integrating geoprospection, excavation and quantitative methods at Meroe, Sudan. Journal of Archaeological Science 70, 2016

Kvamme, K.: Integrating multidimensional geophysical data. Archaeological Prospecting, 13, 2006

Lippmann, E.: 4point light hp: Technische Daten, Bedienungsanleitung, Version 4.55. 2012

Losito, G., Mazzetti A., Trova, A.: Frequency electrical behaviour of soils and archaeological woods at laboratory and field scale in Roman boat area of Pisa-San Lück E., Gebbers R., Rühlmann J., Spangenberg U.: Electrical Conductivity Mapping for Precision Farming. Near Surface Geophysics, 7, 2009

Ottaway, B.S.: Prähistorische Archäometallurgie. Espelkamp, Leidorf, 1994

Panissod, C., Dabas, M., Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, J., Tabbagh, A.: Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays. GEOPHYSICS, VOL. 63, 1998

Rossore (Italy). Geophysical Research Abstracts, Vol. 3. European Geophysical Society (EGS) 26th Assembly in Nice, 2001

Schleifer, N.: Anwendungen der Spektralen Induzierten Polarisation (SIP) in der Archäologie, Verlag Marie Leidorf, 2004

Stöllner, T.: Die zeitliche Einordnung der prähistorischen Montanreviere in den Ost- und Südalpen. In: Oeggli, K und Prast, M. (Hg.), Die Geschichte des Bergbaues in Tirol und seinen angrenzenden Gebieten. Proceedings zum 3. Milestone-Meeting des SFB HiMAT. 2009

Stöllner, T., Breitenlechner, E., Eibner, C., Herd, R., Kienlin, T., Lutz, J., Maass, A., Nicolussi, K., Pichler, T., Pils, R., Röttger, K., Song, B., Taube, N., Thomas, P & Thurner, A.:

Der Mitterberg – Der Großproduzent für Kupfer im östlichen Alpenraum während der Bronzezeit. Archäologie Österreichs Spezial 4, 2011

Turck, R., Della Casa, P., Naef, L.: Prehistoric copper pyrotechnology in the south-eastern Swiss Alps : an overview on previous and current research. Cahiers d'archéologie romande (CAR), 151, 2014

Turck, R., Winkler, A., Stockmaier, M., Della Casa, Ph., Reitmaier, Th., Seifert, M., Oberhänsli, M. and D. Kopp: „Surses GR, Marmorera, Gruba II.” Jahrbuch Archäologie Schweiz 101, 264, 2018

Ullrich, B., Meyer, C. und Weller, A.: Geoelektrik und Georadar in der archäologischen Forschung: Geophysikalische 3D-Untersuchungen in Munigua (Spanien)', in G. A. Wagner (ed), Einführung in die Archäometrie (Berlin), 2007

Ullrich, B., Weller, A. Rücker, C. und Günther, T: Geophysical Prospecting of ancient slag deposits in Munigua (Spain) and Ain al Hajer (Morocco) using Complex Resistivity Tomography', Archaeometallurgy in Europe 2003 (Milan), 2009

Ullrich, B., Freibothe, R., Zoellner, H., Beilke-Voigt, I., Mehner, A., & Kaufmann, G.: Multi-Geophysical Prospection in and around the Hillfort Lossow—A Bronze and Iron Age Central Site in Brandenburg, Germany. Arch. Prospection 2013

Ullrich, B., Wolf, P., Kaufmann, G.: Geophysical Prospection of Iron Slag Heaps at Hamadab, Northern Sudan. Historical Metallurgy 48 for 2014 (published 2015)

Weller, A.: Spektrale induzierte Polarisierung in der Archäometrie. Freiburger Forschungs-Hefte C496, 2003

Weller, A.; Bauerochse, A.; Nordsiek, S.: Spectral induced polarisation – a geophysical method for archaeological prospection in peatlands. Journal of Wetland Archaeology 6, 2006

Induzierte Polarisation in der Biogeophysik

Tina Martin¹, Maximilian Weigand² und Adrian Flores Orozco³

1) Engineering Geology, University Lund, Lund/Sweden, tina.martin@tg.lth.se

2) Bereich Geophysik, Institut für Geowissenschaften und Meteorologie, Universität Bonn, Bonn/Deutschland, mweigand@geo.uni-bonn.de

3) Forschungsbereich Geophysik - Department für Geodesie und Geoinformation, TU Wien, Wien/Österreich, flores@tuwien.ac.at

Zusammenfassung

Die Charakterisierung und Überwachung biologischer Prozesse und Materialien mithilfe der Induzierten Polarisation (IP) hat in den letzten zehn Jahren deutlich an Relevanz zugenommen. Gerade in wichtigen Fragestellungen des Grundwasserschutzes, der Altlastensanierung oder im agrar- und forstwirtschaftlichen Bereich zeigen die bisherigen IP-Studien großes Potenzial, biologische Prozesse zu erfassen und Materialveränderungen zu registrieren.

Um die relativ kleinen biologischen IP-Signaturen zuverlässig aus den Systemgesamtantworten extrahieren und interpretieren zu können, müssen hohe Anforderungen an die Messtechnik, sowie an das System- und Prozessverständnis gestellt werden. Vor allem die Entwicklung von mechanistischen Modellen und die Übertragbarkeit vom Labor ins Feld werden in den nächsten Jahren von entscheidender Bedeutung sein.

Einleitung

Biogeophysik ist eine aufstrebende Disziplin in den Geowissenschaften, die versucht, biologische Prozesse und deren Einfluss auf Geomaterialien mithilfe geophysikalischer Messmethoden zu erfassen (Atekwana und Slater 2009). Aufgrund der mess- und auswertetechnischen Weiterentwicklung hat die Erforschung dieser Prozesse auch im Bereich der Induzierten Polarisation in den letzten Jahren stark zugenommen und die Anwendungsbreite von IP-Messungen erweitert.

Mikrobiologische Vorgänge können die petrophysikalischen Charakteristiken von Gesteinen und Böden signifikant verändern. Durch bakterielles Wachstum und deren Stoffwechselprodukte werden beispielsweise die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Aquiferen modifiziert (Chapelle und Bradley 1997), während Änderungen im Porenraum sich ebenfalls auf die hydraulischen und elektrischen Eigenschaften auswirken (z.B. Seifert 2005, Seifert und Engesgaard 2007, Brovelli et al. 2009). Aber auch makrobiologische Prozesse und Materialien, wie etwa Wurzeln und Bäume, verändern das sie umgebende Ökosystem und haben Einfluss auf die Bodeneigenschaften. Diese können mithilfe von IP ebenfalls erfasst werden.

Untersuchungen bakterieller Einflüsse auf den Boden

Dass mikrobiologische Prozesse aktive oder passive Auswirkungen auf geophysikalische Signaturen haben, erschien bis vor 20 Jahren noch relativ undenkbar (Atekwana und Slater 2009). Seit es jedoch erste Studien gibt, die den biologischen Abbau (z.B. von LNAPL – light nonaqueous-phase liquid) in kontaminierten Gebieten untersuchen (Atekwana et al. 2000, 2004), sind auch die Bakterien und ihre Abscheidungsprodukte in den Fokus der IP-Forschung geraten. Diese Ergebnisse haben nicht nur Einfluss auf hydrogeologische Fragestellungen, sondern auch auf die Sanierung von kontaminierten Bereichen und für die

Bodenstabilisierung. Selbst für die CO_2 Sequestration, die Ölgewinnung oder für astrobiologische Studien (Davis et al. 2006) kann IP damit tendenziell genutzt werden.

In diesen ersten Veröffentlichungen über den Einfluss von Bakterien auf die IP-Signale konnte beobachtet werden, dass sich durch mikrobiologisches Wachstum der Bakterien (Änderung der Bakterienzeldichte) und der Ausbildung von Biofilmen (zusammenhängende Bereiche von Bakterien bzw. ihren Ausscheidungsprodukten) der Imaginärteil der Leitfähigkeit, σ'' , signifikant verändert (Abdel Aal et al. 2004, Ntarlagiannis et al. 2005, Williams et al. 2005, Davis et al. 2006). So korrelieren die Anstiege im Zellwachstum mit einer Zunahme von σ'' . Dies wird auf eine Vergrößerung der inneren Oberfläche durch die Bakterien und die veränderte Ladungsdichte der Zellen zurückgeführt und gilt umso stärker für lebende Bakterien (Abdel Aal et al. 2010b). Tote Bakterien scheinen dagegen ihre elektrischen Eigenschaften durch den Zusammenbruch ihrer Biomembrane zu verlieren. Der Realteil der Leitfähigkeit, σ' , zeigt hingegen keine deutliche Beziehung zum Bakterienwachstum und wird eher von mineralischen Verwitterungsprozessen kontrolliert, wodurch die Fluidleitfähigkeit durch gelöste Ionen erhöht wird.

Beispielhaft seien hier die Laborversuche von Ntarlagiannis et al. (2005) vorgestellt. Dabei wurden sandgefüllte Laborsäulen mit zwei verschiedenen Bakterienarten in variierender Bakteriendichte durchflossen. Zum einen mit einem metallreduzierenden Bakterium, *Shewanella putrefaciens* 200, welches für die Sanierung von metallischen Kontaminationen verwendet wird, und zum anderen mit *Escherichia coli* (*E.coli*), einem Pathogen, welches in porösen Medien (Grundwasserleitern) vorkommen kann. Die Säulen wurden über längere Zeiträume mit SIP vermessen. In Abbildung 1 sind die Ergebnisse für das *E.coli* Bakterium zu sehen. Dabei zeigt σ'' eine deutlich negative Änderung nach ca. einer Woche. Die Autoren erklären das mit der reduzierten Ionenmobilität durch die erhöhte Bakterienkonzentration in engen Poren („Verstopfungen“), währenddessen bei niedriger Zellkonzentration der IP-Effekt von der Interaktion zwischen Bakterienzellen und mineralischer Oberfläche kommen kann. Gerade die Bildung von Biofilmen begünstigen die „Verstopfungen“ der Poren und die Änderungen der Fließwege (Ntarlagiannis und Ferguson 2009, Abdel Aal et al. 2010a). Der Anstieg des Leitfähigkeitsterms, σ'/σ_w , wird auf diese Änderungen in den Fließwegen zurückgeführt.

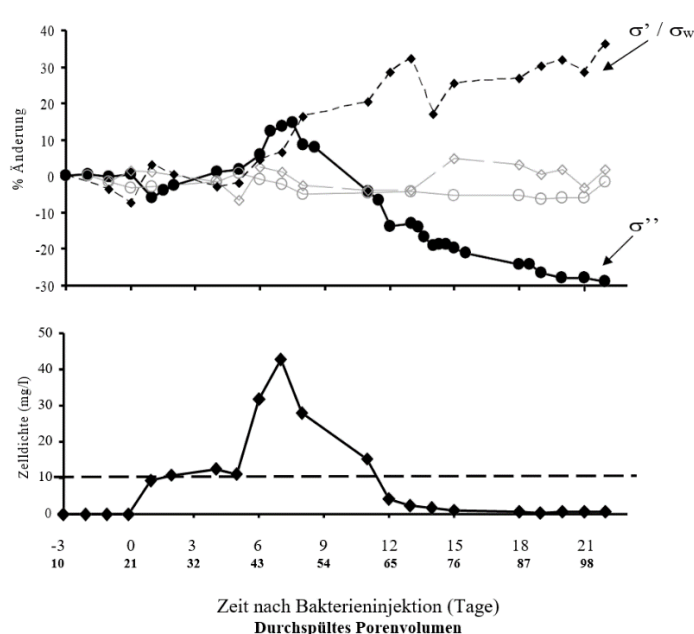


Abbildung 1: IP Ergebnisse (oben) und Bakteriendichte (unten) der Proben für das *E.coli* Experiment nach Ntarlagiannis et al (2005). Schwarze, gefüllte Symbole sind die aktiven, bakteriendurchflossenen Säulen, graue, offene Symbole die Kontrollsäulen. Kreise = σ'' , Rauten = σ' / σ_w .

Zusammenfassend zeigt diese Studie, dass es mithilfe von IP Messungen möglich ist, Bakterienzellen im Boden zu messen, selbst wenn diese nicht metabolisch aktiv sind. So kann σ'' effektiv genutzt werden, um Änderungen in den petrophysikalischen Eigenschaften zu überwachen. Allerdings sind die beobachteten IP Effekte sehr klein (Phasenänderung von wenigen Milliradian), so dass eine Messung im Feld nur unter optimalen Bedingungen (Kalibration, gutes Signal-Rausch-Verhältnis, etc.) möglich ist.

Neuere Studien zeigen auch, dass selbst mikrobiologisch induzierte Karbonatausfällungen (MICP - microbial induced carbonate precipitation) zu Bodenstabilisierungszwecken mit IP erfasst, sowie räumliche und zeitliche Änderungen infolge der Ausbreitung beobachtet werden können (Saneiyar et al. 2018, 2019). Nur anhand der Widerstandsamplituden war dies nicht möglich.

Zur Anwendung bei Sanierungen in kontaminierten Bereichen wurden in der Vergangenheit einige Experimente im Labormaßstab zum Abbau von mineralischen Produkten mithilfe von Bakterien durchgeführt (Williams et al. 2005, Personna et al. 2008, Abdel Aal et al. 2009, Abdel Aal und Atekwana 2014). Sie alle kommen ebenfalls zu dem Schluss, dass die durch den mikrobiologischen Einfluss hervorgerufenen Änderungen der elektrischen Eigenschaften mithilfe IP (hauptsächlich durch σ'') beobachtet werden können. Die Übertragung der Laborergebnisse ins Feld steht jedoch noch am Anfang. Gerade bei Kohlenwasserstoff-kontaminierten Gebieten zeigen mehrere Studien, wie wichtig es ist, auch die durch mikrobiologische Prozesse hervorgerufenen räumlichen und zeitlichen Veränderungen mit in die Interpretation der geophysikalischen Daten einzubeziehen (Atekwana und Atekwana 2010). Das setzt voraus, dass diese Prozesse in Natura verstanden und beobachtet werden können.

Williams et al. (2009) präsentierten dazu in ihren Feldstudien Messungen an einem Aquifer, bei dem eisenreduzierende Bakterien das durch Abwässer zugeführte Uranium binden. Dieser Prozess wurde über einen längeren Zeitraum (> 2 Jahre) mit IP überwacht (1 Hz). Dabei konnte beobachtet werden, dass raumzeitliche Änderungen in der Phase mit der Akkumulation von Eisenmineralen korrelieren. Der IP-Effekt steigt dabei mit der Ansammlung von Eisensulfiden signifikant an. Später konnte auch gezeigt werden, dass sich durch die Zunahme der akkumulierten Eisenminerale (und damit der Abnahme der Gesamtoberfläche) auch die Frequenz des Phasenpeaks zu niedrigeren Frequenzen hin verschiebt (Flores Orozco et al. 2013). Mithilfe der SIP Daten war es dann auch möglich, die durch die Biostimulation aktiven geochemischen Bereiche tomographisch darzustellen (Abbildung 2 rechts). Aber auch Änderungen im Redoxpotential konnten bei einer weiteren Studie im selben Gebiet (Flores Orozco et al. 2011) beobachtet werden. So registrierten die Autoren zunächst wieder hohe IP Signale aufgrund der anhaltenden Stimulation der eisenreduzierenden Bakterien. Jedoch nahmen nach einer erneuter Biostimulation (Acetatinjektion) die Phaseeffekte nach ein paar Tagen ab (Abbildung 2 links). Diese Abnahme der Phase war dabei konsistent mit dem Anstieg von flüssigen Sulfiden ($\Sigma\text{H}_2\text{S}$). Die sulfatreduzierenden Bakterien dominierten jetzt gegenüber den eisenreduzierenden Bakterien, was zum einen eine ineffektive Uranimmobilisierung verursachte und zum anderen signifikant kleinere Phaseeffekte aufgrund der fehlenden, ausgefällten Eisenminerale (Fe^{2+} wird als elektroaktives Ion im Grundwasser für die Elektrodenpolarisation benötigt). Anhand dieser Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass multi-frequente SIP-Messungen nicht nur Auskunft über die Ansammlung von Eisensulfiden geben können, sondern auch über Änderungen im Redoxpotential.

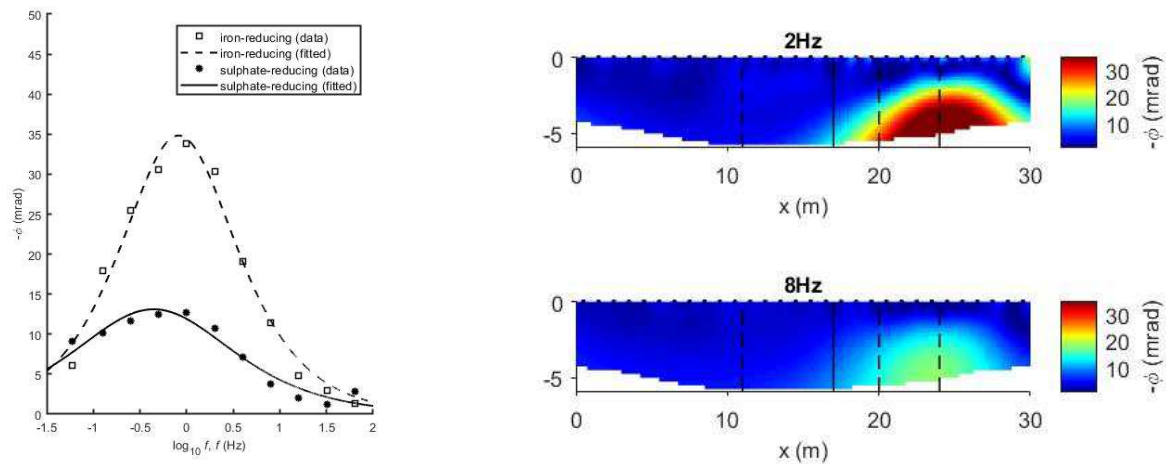


Abbildung 2: Beispielhafte Ergebnisse von SIP Messungen an einem Uran-kontaminierten Aquifer während der Biosanierung. Die Abnahme der Phase korreliert mit den geochemischen Änderungen des Grundwassers (links), vor allem mit der Konzentration von gelösten Fe(II) Ionen. Die rechten Tomogramme zeigen die Frequenzabhängigkeit der biogeochemischen Prozesse während der Biosanierung.

Untersuchungen des Boden-Wurzel-Systems

Neben der Charakterisierung von aktiven und passiven bakteriellen Prozessen im Sinne klassischer geophysikalischer Anwendungen wurde in den letzten Jahren intensiv an der Untersuchung von Pflanzen- und Baumwurzeln mittels IP gearbeitet. Nicht- oder minimalinvasive Methoden werden im Kontext der Rhizosphäre, der 'hidden half' (Eshel und Beekmann 2013), dringend benötigt, um aktuelle destruktive Untersuchungsverfahren zu unterstützen bzw. abzulösen. Wurzelsysteme stellen integrale Bestandteile des globalen Wasser- und Nährstoffkreislaufes dar, und ein besseres Verständnis ihrer Verteilung und Funktion kann nicht nur im landwirtschaftlichen Bereich zu Produktivitätssteigerungen führen, sondern auch helfen, Wasserkreisläufe besser zu verstehen und zu modellieren (z.B. Desborough 1997). Im Vergleich zu anderen tomographischen Methoden wie Kernspinresonanz (z.B. Bačić und Ratković 1987) und Computertomographie (z.B. Gregory et al. 2003) haben elektrische Methoden momentan noch den Vorteil, skalenübergreifend im Labor und auf dem Feld angewendet werden zu können.

Erste Messungen von frequenzabhängigen IP-Effekten an Pflanzenwurzeln wurden von Cloupek (1972, 1976) durchgeführt. Hierbei wurden hohe Korrelationen zwischen Wurzelmasse/-oberfläche und elektrischen Kapazitäten gefunden. Erste qualitative Modellansätze wurden von Dalton (1995) formuliert und in den folgenden Jahren vermehrt aufgegriffen und erweitert (Ellis et al. 2013; Dietrich et al. 2013). Aktuelle Zusammenfassungen zu den Arbeiten sind in Mancuso (2012), Heřmanská et al. (2015) und Cseresnyés et al. (2016) zu finden.

Im Gegensatz zu hölzernen Wurzeln von Bäumen oder Sträuchern zeigen Pflanzenwurzeln im Allgemeinen nur geringe Widerstandscontraste zur umgebenden Porenflüssigkeit (Abbildung 3, links). Dies ist durch ihre kleinen Durchmesser und durch die fehlende hölzerne Außenschicht zu erklären, obwohl innerhalb der einzelnen Wurzelsegmente eine höhere Ionenkonzentration zu erwarten ist (z.B. Marschner 2012).

Pflanzenwurzeln zeigen jedoch eine charakteristische Polarisation bei Frequenzen < 100 Hz (Abbildung 3). Daher birgt die SIP-Methode das Potenzial, zusätzlich direkte Informationen über Wurzelsysteme auch in den Fällen zu liefern, in denen das elektrische Gleichstrom-Widerstandssignal zu klein ist oder durch andere Prozesse überlagert wird. Darüber hinaus

können charakteristische Relaxationszeiten mit Hilfe von spektralen Modellen bestimmt werden, die an den Frequenzverlauf der Polarisation angepasst werden (z.B. Cole und Cole, 1941; Nordsiek und Weller, 2008). In Anlehnung an etablierte Modellvorstellungen von niedrigfrequenten Polarisationsmechanismen (Schurr 1964; Revil und Florsch 2010; Bucker et al. 2018) gibt es erste Versuche, Größenordnungen der zugrundeliegenden polarisierenden Wurzelstrukturen zu quantifizieren (Weigand und Kemna 2018). Diese Art der Auswertung ermöglicht potenziell eine Untersuchung von Strukturen und Prozessen auf einer sehr viel kleineren Skala (μm), als es die bildgebende Auswertung elektrischer Messungen erlaubt.

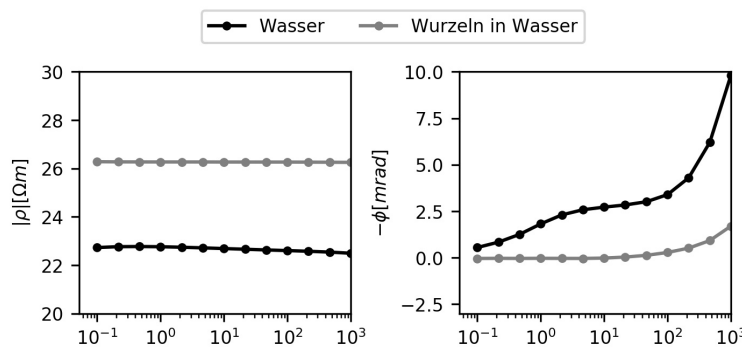


Abbildung 3: SIP-Signatur von Rapswurzeln und Leitungswasser.

Gekoppelt mit schnellen zeitlichen Messzyklen können auch kleine Änderungen im Polarisationsverhalten von Wurzelsystemen detektiert werden, welche mit physiologischen Prozessen innerhalb der Pflanze korrelieren. Hierbei werden zum Beispiel Tagesgänge im IP-Signal beobachtet (Abbildung 4), welche auf physiologische Prozesse wie etwa Nährstoff- und Wassertransport innerhalb der Pflanze schließen lassen (Weigand und Kemna 2018). Die bildgebende Untersuchung von Wurzelsystemen wird bisher meistens nur passiv durchgeführt, indem Gleichstromgeoelektrik (ERT) zur Detektion von Wassergehalten verwendet wird. Diese werden maßgeblich von der Wurzelverteilung kontrolliert, so dass Kenntnis über die Wasserverteilung auf die Verteilung der Wurzeln schließen lässt. Es gibt aber auch erste Versuche, mittels elektrischer Impedanztomographie (EIT) Wurzelsysteme direkt abzubilden (Abbildung 5), jedoch sind diese Ansätze bisher auf einfache Laborszenarien beschränkt (Weigand et al. 2018).

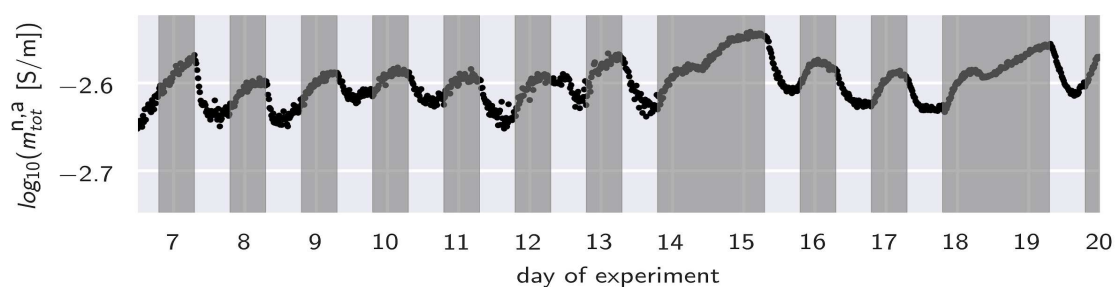


Abbildung 4: Gesamtpolarisation einer Rapspflanze über mehrere Tagesgänge hinweg. Gezeigt ist die normierte Gesamtpolarisation, bestimmt durch eine Debyezerlegung von gemessenen SIP-Signaturen. Grau schraffierte Abschnitte stellen verdunkelte Zeitabschnitte dar. Nach Weigand und Kemna (2018).

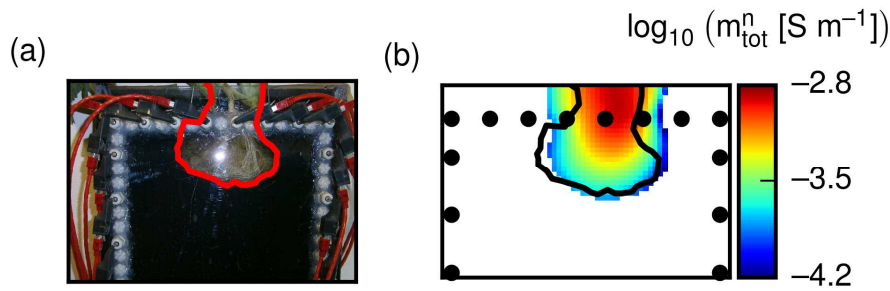


Abbildung 5: Tomographieergebnis einer EIT-Messung (10 Hz), gemessen an einer Rapswurzel in Leitungswasser. Nach Weigand und Kemna (2017).

Diese Ergebnisse sind vielversprechend, jedoch wird die Anwendung von EIT in komplexen Labor- oder Feldversuchen noch durch eine Vielzahl an sich überlagernden Prozessen erschwert. So erzeugen variable Wassergehalte starke Schwankungen im elektrischen Gleichstromsignal und in den IP-Signaturen, was die direkte Beobachtung der kleinen Wurzelsignaturen schwierig macht. Beispielhaft sei hier die Untersuchung eines Maisfeldes mit unterschiedlichen Bewuchsdichten und Bewässerungspraktiken mittels EIT gezeigt (Abbildung 6). Während es klare Unterschiede in der Polarisations-signatur der drei verschiedenen Plots gibt (Abbildung 6, unten), deuten die Unterschiede im spezifischen Widerstand (Abbildung 6, mittig) jedoch auf variable Wassergehalte als Primärquelle für die beobachteten Unterschiede hin (z.B. Ghorbani et al. 2008, Kelter et al. 2018). Zukünftige Forschungsschwerpunkte werden sich daher mit der Trennung der verschiedenen Signale beschäftigen. Dies kann etwa durch detaillierte Simulation und anschließende Bildgebung der verschiedenen Prozesse geschehen, wird aktuell aber noch durch das Fehlen von validierten elektrischen (Polarisations-)Modellen von Wurzelsystemen erschwert.

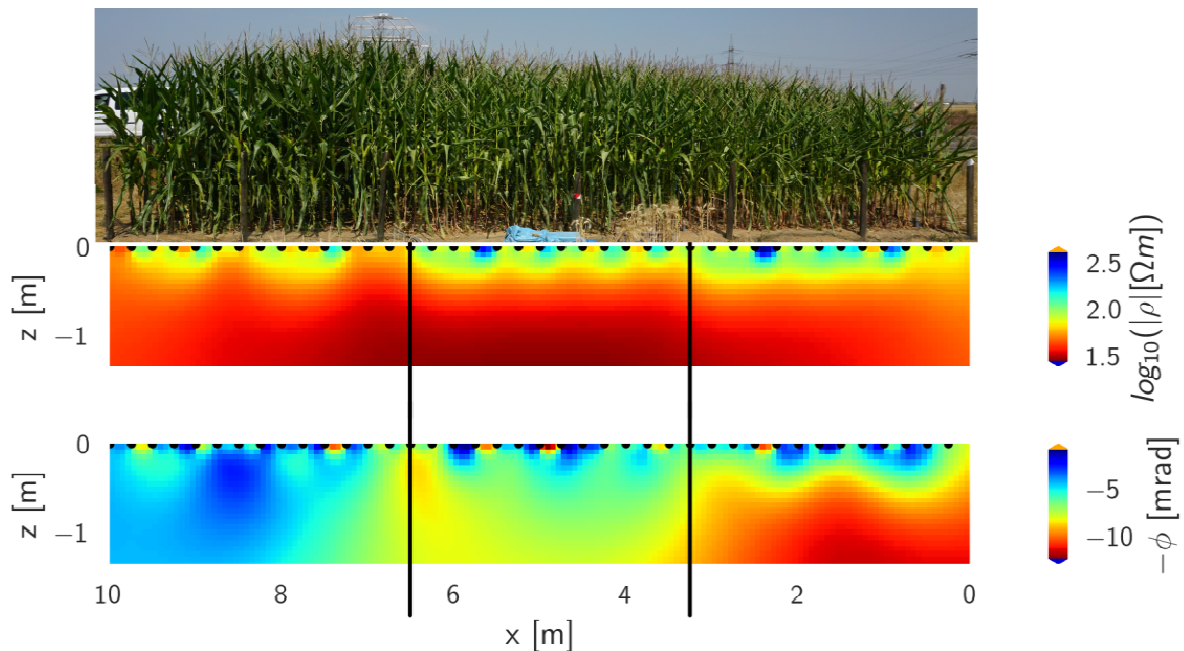


Abbildung 6: EIT-Messung (14 Hz) über einem Maisfeld mit verschiedenen Bewuchsdichten und Bewässerungsstrategien. Nach Weigand et al. (2018).

Bessere Ergebnisse konnten bei IP-Messungen über Baumwurzeln erzielt werden (Abbildung 7): Während die Amplitude des spezifischen elektrischen Widerstands ein sehr inhomogenes Bild des Untergrundes zeigt, wahrscheinlich bedingt durch stark variable Lithologie und Wassergehalte, können die Wurzelzonen der drei Bäume gut im Tomogramm der Phasenverschiebung detektiert werden (Abbildung 7, unten). Gegenüber den Nutzpflanzenwurzeln weisen Baumwurzeln eine wesentliche größere polarisierbare Biomasse auf, was die Detektion auch unter stark inhomogenen Bedingungen vereinfacht.

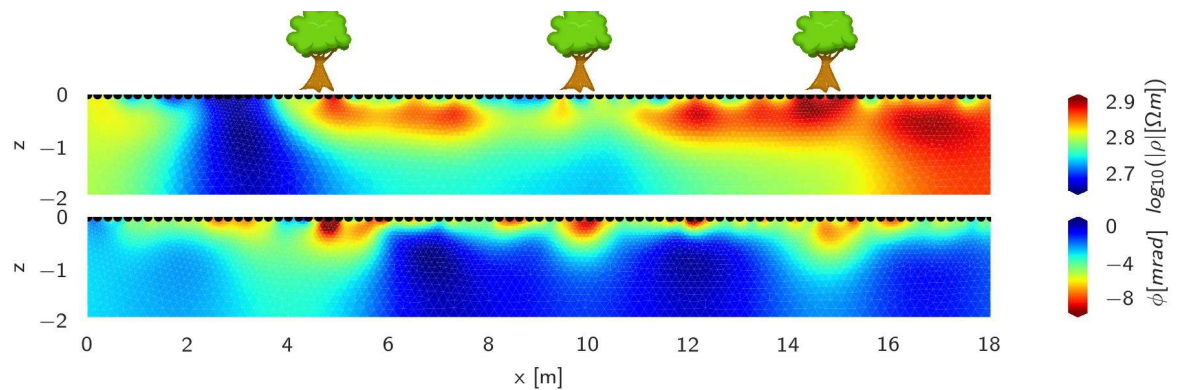


Abbildung 7: IP Messungen entlang drei Obstbäumen. Oben: Widerstandsamplitude, Unten: Polarisationsignal (Phase).

Untersuchungen von Holz und Bäumen

Neben der Erkundung von Baumwurzeln eignet sich das IP Verfahren auch für Fragestellungen im archäologischen und forstwirtschaftlichen Bereich oder zur Stabilitäts erkundung von Straßenbäumen. Durch den Nachweis, dass Holz polarisierbar ist, konnten beispielsweise historisch bedeutsamen hölzernen Strukturen im Untergrund mit IP detektiert werden (Schleifer et al. 2002). Die Anwendung von geoelektrischen Verfahren (ERT) an Baumstämmen zeigte, dass tomographische Untersuchungen geeignet sind, die internen elektrischen Strukturen eines Baumes wiederzugeben und mögliche Fluidprozesse zu beobachten (z.B. al Hagrey 2006). Aber neben dem spezifischen Widerstand kann die Phasenverschiebung zusätzliche Informationen liefern, die z.B. zur Abschätzung von Pilzbefall und damit zum Baumzustand und dessen Standsicherheit (Martin 2009, 2012, Martin & Günther 2013) oder zur Klassifizierung verschiedener Baumarten (Martin et al. 2015) genutzt werden kann. Daneben bietet die Phasenverschiebung auch Potenzial, die Hieb reife von Bäumen (z.B. Sandelholzbäumen) festzustellen (Martin et al. 2015). Parallel zu den Anwendungen im Wurzelbereich (s.o.) sind Untersuchungen zum Einfluss von Bäumen auf den Wasserhaushalt eines räumlich begrenzten Gebietes ebenfalls vorstellbar.

Die im Folgenden dargestellten Untersuchungsergebnisse stammen alle von der heimischen Laubbaumart *Quercus spp.* (Eiche).

Holz ist ein sehr heterogenes Material mit einer starken Anisotropie, die sich auch auf den IP-Effekt auswirkt (Abbildung 8). Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurden Proben mit verschiedener Orientierung zum Stammachse (axial, radial, tangential) entnommen und im Labor mittels SIP vermessen. Deutliche Unterschiede sind sowohl im spezifischen Widerstand (Abbildung 8a) als auch in der Phasenverschiebung (Abbildung 8b) zu sehen. Die niedrigsten spezifischen Widerstände und die höchsten Phasen zeigen die axialen Proben, während die tangentialen Proben hohe Widerstände und kleine Phasen aufweisen. Die radialen Probenwerte befinden sich zwischen denen der axialen und tangentialen Proben, was mit der Baumstruktur erklärt werden kann. Durch den Wassertransport im Baum sind die Holzzellen im Wesentlichen axial angeordnet. Die radialen Holzstrahlen

beschränken den Nährstofftransport in radialer Richtung, währenddessen in tangentialer Richtung praktisch keine Transportprozesse stattfinden. Interessant sind daneben auch die Unterschiede innerhalb der axialen Proben. Diese unterscheiden sich bei der Entnahme durch ihre Entfernung vom Markstrahl (Achse des Stammes). Während Probe *axial 8* ziemlich am Rand liegt (außen, Nähe Borke/Splintholz) und Probe *axial 5* mittig zwischen Rand und Zentrum, liegt die Probe *axial 3* im Zentrum des Stammes (innen, Kernholz). Dort befinden sich eingelagerte Stoffe, z.B. eichentypische, gut leitfähige Gerbstoffe. Daher unterscheiden sich diese Proben zwar in der Phasenverschiebung (b) durch den Einfluss des Poren-/Zellfluids aber nicht im Imaginärteil der Leitfähigkeit (c), welcher im Wesentlichen durch die Zellstruktur beeinflusst wird.

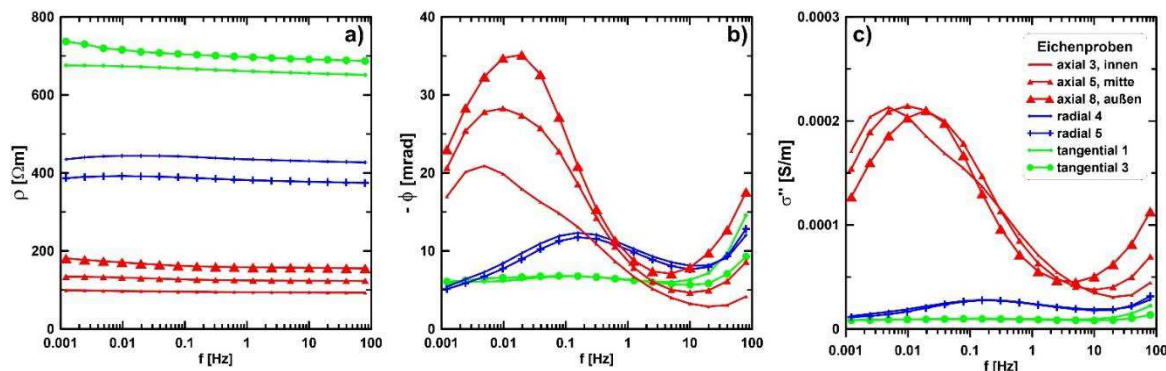


Abbildung 8: SIP Ergebnisse zur Untersuchung der Anisotropie einer Eiche. Dafür wurden Proben mit verschiedener Orientierung zur Achse des Stammes gebohrt (axial, radial, tangential). a) Amplitude des spezifischen Widerstands, b) Phasenverschiebung, und c) Imaginärteil der Leitfähigkeit. Nach Martin (2009).

Neben der Klassifizierung der Anisotropie von gesundem Holz ist die Phasenverschiebung auch ein sehr guter Indikator für den Befall und den Abbau des Holzes durch Pilze. Dies konnte in mehreren Laborexperimenten an künstlich infizierten Holzproben nachgewiesen werden (Martin 2009, 2012). Dabei zeigte sich, dass der spezifische Widerstand erst deutlich mit zunehmendem Pilzbefall abnimmt (durch die vom Pilz benötigte Feuchtigkeit für den Stoffwechsel), bevor die Holzprobe nach Absterben des Pilzes anfängt auszutrocknen. Demgegenüber steht eine kontinuierliche Abnahme der Phase durch die Zersetzung der (polarisationsfähigen) Holzstruktur durch den Pilz.

Diese Erkenntnisse spiegeln sich auch bei Proben wider, die aus einem natürlich-infizierten Baum nach Fällung entnommen wurden. So zeigt sich, dass der spezifische Widerstand für die infizierten Proben deutlich geringer ist als für die gesunden (Abbildung 9a). Auch die Phasenverschiebung nimmt signifikant ab, sobald das Holz vom Pilz infiziert ist (Abbildung 9b). Eine Unterscheidung zwischen gesundem (am Feuchtetransport teilnehmenden) Splintholz und infiziertem Kernholz ist im Widerstand aufgrund der ähnlichen Signaturen nicht möglich. Demgegenüber kann eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen den drei untersuchten Probenarten mit der Phasenverschiebung bei niedrigen Frequenzen (< 0,1 Hz) erfolgen. In Abbildung 9c ist analog zu Abbildung 8c der verschiedenartige Aufbau der Holzzellen bzw. -strukturen zu erkennen. So zeigt das Splintholz die größten Effekte bei sehr niedrigen Frequenzen im Imaginärteil der Leitfähigkeit, welche durch die dort vorhandenen Transportstrukturen (noch keine verfestigten Zellen mit eingelagerten Stoffen) erklärt werden können.

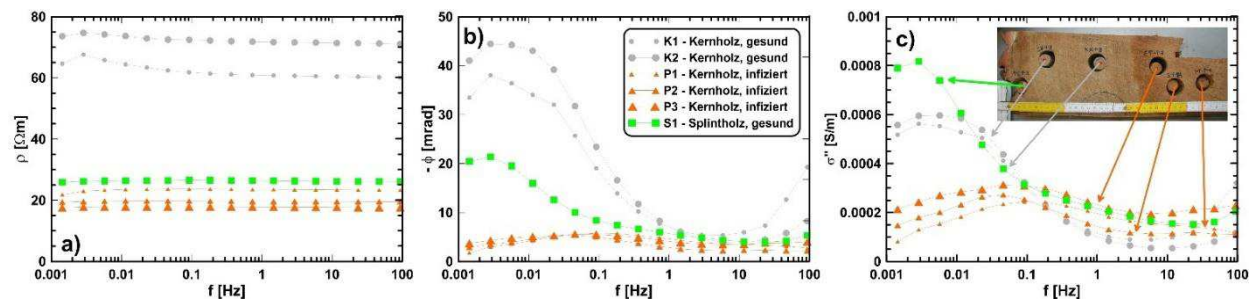


Abbildung 9: SIP Ergebnisse zur Untersuchung von Pilzbefall einer Eiche. Dafür wurden Proben aus verschiedenen Bereichen gebohrt (Splintholz, gesundes Kernholz, pilzinfiziertes Kernholz). a) Amplitude des spezifischen Widerstands, b) Phasenverschiebung, c) Imaginärteil der Leitfähigkeit. Nach Martin (2009).

Messungen im Labor an (passivem) Holz unterscheiden sich von Messungen an stehenden Bäumen (aktiven Holz). Beispielsweise wirkt sich der Einfluss der Temperatur (bzw. der Jahreszeit) nicht nur direkt auf die elektrischen Eigenschaften aus, sondern verursacht auch biologische Änderungen. Diese Änderungen sind in Abbildung 10 zu sehen, wo die Widerstandsamplituden- und Phasentomogramme einer gesunden Eiche sowohl für eine Messung im Sommer als auch im Winter dargestellt sind. Deutlich sind die ringförmigen Strukturen in allen Tomogrammen zu sehen. Diese korrelieren sehr gut mit dem Aufbau des Baumstammes bzw. dessen unterschiedlichen Holzbereichen. So erscheint der Splintholzbereich im Sommer als gut leitende Zone, da in den äußeren Bereichen der Wasser- und Nährstofftransport stattfindet (Abbildung 10a). Mit zunehmendem Alter des Holzes (in Richtung Stammmitte) nimmt das Holz nicht mehr am Transportprozess teil und beginnt zu „verkernen“. Dies äußert sich in höheren spezifischen Widerständen. Die Einlagerungen der gut leitfähigen Gerbstoffe spiegeln sich im Zentrum des Stammes als eine niedrige Widerstandszone wider. Die unterschiedliche Zone sind auch in der Phasenverschiebung zu sehen (Abbildung 10b), wobei die niedrige Phasenanomalie im Zentrum größtenteils nur durch das leitfähige Zellfluid bedingt ist und weniger durch abweichende Zellstrukturen (vgl. dazu auch obigen Text und Abbildung 8).

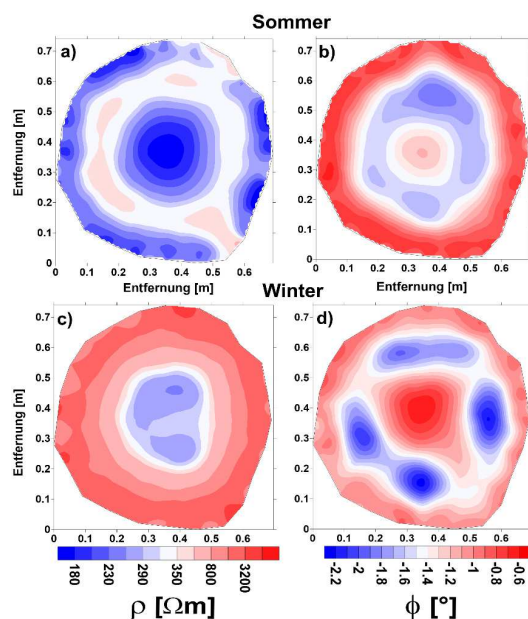


Abbildung 10: Tomographische Abbildungen von SIP Messungen im Feld bei $f = 0.16$ Hz. Dabei wurde ein gesunder Eichenbaum zu verschiedenen Jahreszeiten gemessen. Oben: Amplitude des spezifischen Widerstands (a) und Phasenverschiebung (b) einer Eiche im Sommer. Deutlich zeigt sich die ringförmige Struktur des Baumes (Splintholz, Kernholz, Einfluss der Gerbstoffe). Unten: derselbe Baum im Winter. Während die generelle Struktur in der Phasenverschiebung (d) erhalten bleibt, ändert sich der spezifische Widerstand drastisch (c). Grund dafür ist der im Herbst und Winter eingestellte Wasser- und Nährstofftransport. Nach Martin (2009).

Deutliche Differenzen zwischen den Jahreszeiten sind in der Amplitude des spezifischen Widerstands (Abbildungen 10a und 10c) erkennbar. Aufgrund des eingestellten Saftflusses/Wassertransportes im Herbst und Winter ist eine Unterscheidung zwischen den äußeren Zonen nicht mehr erkennbar. Beide Zonen erscheinen als hochohmige Ringe. Hingegen ist die Empfindlichkeit der Phasenverschiebung gegenüber Temperatureinflüssen nicht so stark (Abbildung 10d). Zwar ändern sich die Werte auch hier leicht, die dreigeteilte ringförmige Struktur bleibt jedoch erhalten.

Diese ringförmige Struktur ist auch ein guter Indikator für einen (auch anfänglichen) Pilzbefall innerhalb des Baumes. In Abbildung 11 sind beispielhaft die Messungen an einer stehenden Eiche im Spätherbst dargestellt, die aufgrund eines Anfahrtschadens einen Pilzbefall zeigte und im Anschluss an die Messungen gefällt wurde. Die Widerstandstomogramme beider Messebenen (Abbildungen 11b und 11e) zeigen eine deutliche Unterbrechung der ringförmigen Struktur an der Stelle des Anfahrtschadens (und dem anschließend erfolgten Ort des Pilzeintrittes). Statt der im Spätherbst zu erwartenden hohen spezifischen Widerständen in den Außenbereichen sind die Werte sehr niedrig. In Analogie zu den Labormessungen deutet das auf einen ausgeprägten Pilzbefall hin, wie auch auf den Fotos (Abbildungen 11a und 11d - mit markiertem verfärbtem Bereich) erkennbar. Allerdings ist eine Abschätzung der Ausbreitung schwierig, da eine Unterscheidung zwischen der eichentypischen Gerbstoffeinlagerung im gesunden Holz und dem pilzinfierten Holz nicht möglich ist. Auch in der Phasenverschiebung (Abbildungen 11c und 11f) ist eine deutliche Abweichung von der ringförmigen Struktur zu sehen. Aber auch hier ist eine eindeutige Beurteilung noch nicht möglich, da zum einen die gewählte Frequenz ($f = 0.3 \text{ Hz}$) aufgrund von Zeitmangel (Straßensperrung aufgrund anschließender Fällung) nicht optimal war. Wie in Abbildung 9 ersichtlich, ist eine sichere Unterscheidung erst bei Frequenzen $< 0,1 \text{ Hz}$ möglich. Zum anderen ist die Phase sehr sensitiv gegenüber möglichen Störungen bei Feldmessungen (bspw. durch ungenügende Elektrodenankopplung).

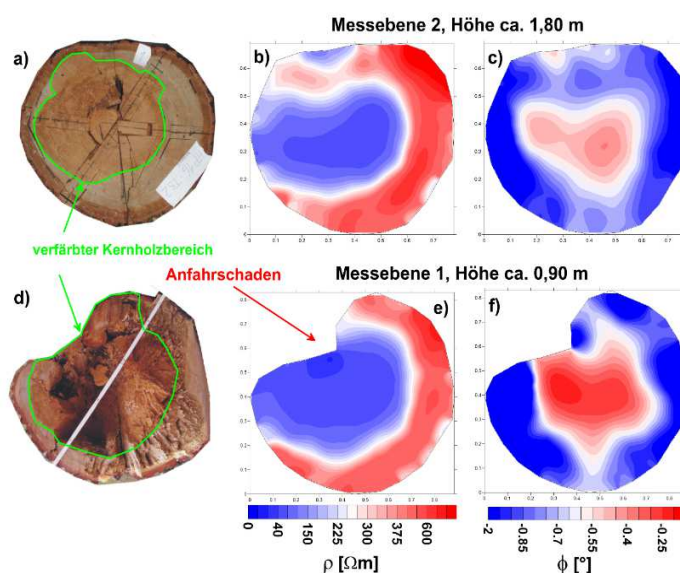


Abbildung 11: Beispiel einer Feldmessung an einer pilzinfierten Eiche für $f = 0.3 \text{ Hz}$. Dabei wurde in zwei unterschiedlichen Messebenen gemessen und der Baum anschließend gefällt. Sowohl in der Amplitude des spezifischen Widerstands (b, e) als auch in der Phasenverschiebung (c, f) ist die Unterbrechung der ringförmigen Struktur zu erkennen. An dieser Seite breitete sich der Pilz aus, was auch nach Fällung am verfärbten Holz erkennbar war (a, d). Nach Martin (2009).

Zusammenfassung & Ausblick

Die Benutzung von elektrischen Polarisierungssignalen in der Biogeophysik ist eine relativ neue Anwendungsmethode mit großem Potenzial für heutige und zukünftige Fragestellungen. So zeigen viele Studien, dass die IP-Signaturen durch Bakterien oder durch von Bakterien verursachte Prozesse verändert werden und damit erfasst und beobachtet

werden können. Auch makrobiologische Prozesse bzw. Materialien wie z.B. der strukturelle und funktionelle Aufbau von Pflanzenwurzeln und Bäumen können gemessen und zum Teil eindeutig charakterisiert werden.

Diese Kenntnisse können einen essentiellen Beitrag in wichtigen Fragestellungen wie z.B. im Bereich des Grundwasser- (Untersuchungen von kontaminierten Aquiferen) und Umweltschutzes (Überwachung von in-situ Altlastensanierung) liefern. Auch zur Sicherstellung der Nahrungsmittelversorgung in der Agrarwirtschaft (Boden-Wurzel Interaktion zur optimalen Bodennutzung) sowie in archäologischen und forstwirtschaftlichen Fragestellungen (Standssicherheit und Hiebsreife von Bäumen) können IP-Messungen genutzt werden.

Obwohl es einige vielversprechende Ansätze und Ergebnisse gibt, steht die Anwendung der IP-Verfahren zur Charakterisierung von biologischen Strukturen und Prozessen noch am Anfang. Gerade die Entwicklung von mechanistischen Modellen bzw. die Simulation sich überlagernder Prozesse sowie die Übertragbarkeit der im Labor gewonnenen Erkenntnisse auf die Feldskala werden in den nächsten Jahren von entscheidender Bedeutung sein.

Literatur

Abdel Aal, G.Z., Atekwana, E.A., Slater, L.D. und E.A. Atekwana, 2004 "Effects of microbial processes on electrolytic and interfacial electrical properties of unconsolidated sediments", *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12505, doi:10.1029/2004GL020030.

Abdel Aal, G.Z., Atekwana, E., Radzikowski, S. und S. Rossbach, 2009 "Effect of bacterial adsorption on low frequency electrical properties of clean quartz sands and iron-oxide coated sands", *Geophys. Res. Lett.*, 36, L04403, doi:10.1029/2008GL036196.

Abdel Aal, G. Z., Atekwana, E. A. und E.A. Atekwana, 2010a "Effect of bioclogging in porous media on complex conductivity signatures", *J. Geophys. Res.*, 115, G00G07, doi:10.1029/2009JG001159.

Abdel Aal, G.Z., Atekwana, E.A., Rossbach, S. und D.D. Werkema, 2010b "Sensitivity of geoelectrical measurements to the presence of bacteria in porous media", *J. Geophys. Res.*, 115, G03017, doi:10.1029/2009JG001279.

Abdel Aal, G.Z. und E. A. Atekwana, 2014 "Spectral Induced Polarization (SIP) Response of biodegraded oil in porous media", *Geophysical Journal International*, 196, Nr. 2, 804-817.

al Hagrey, S.A., 2006 "Electrical resistivity imaging of tree trunks", *Near Surface Geophysics*, 179 - 187.

Atekwana, E.A., Sauck, W.A. und D.D. Jr. Werkema, 2000 "Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site", *J. appl. Geophys.*, 44, 167-180.

Atekwana, E.A., Atekwana, E., Legall, F.D. und R.V. Krishnamurthy, 2004 "Field evidence for geophysical detection of subsurface zones of enhanced microbial activity", *Geophys. Res. Lett.*, 31(23), L23501, doi:10.1029/2004GL021359.

Atekwana E.A. und L. Slater, 2009 "Biogeophysics: A new frontier in earth science research", *Reviews of Geophysics*, 47, RG4004 / 2009

Atekwana, E. und E.A. Atekwana, 2010 "Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites: a review", *Surv. Geophys.*, 31(2), 247-283.

Bačić, G. und S. Ratković, 1987. "NMR studies of radial exchange and distribution of water in maize roots: the relevance of modelling of exchange kinetics." *Journal of Experimental Botany* 38 (8). Soc Experiment Biol: 1284-1297. doi:10.1093/jxb/38.8.1284.

Brovelli, A., Malaguerra, F. und D.A. Barry, 2009 "Bioclogging in porous media: Model development and sensitivity to initial conditions", *Environ. Model. Software*, 24, 611 - 626, doi:10.1016/j.envsoft.2008.10.001.

Bücker, M., Flores Orozco, A. und A. Kemna, 2018 "Electro-chemical polarization around metallic particles-part 1: The Role of Diffuse-Layer and Volume-Diffusion Relaxation." *Geophysics* 83 (4), E203-217. doi: <https://doi.org/10.1190/geo2017-0401.1>

- Chapelle, F.H. und P.M. Bradley, 1997 "Alteration of aquifer geochemistry by microorganisms", in *Manual of Environmental Microbiology*, edited by C. J. Hurst, pp. 558–564, ASM Press, Washington, D. C.
- Chloupek, O., 1972 "The Relationship Between Electric Capacitance and Some Other Parameters of Plant Roots." *Biologia Plantarum* 14 (3). Springer: 227–30. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02921255>
- Chloupek, O., 1976 "Die Bewertung des Wurzelsystems von Senfpflanzen auf Grund der dielektrischen Eigenschaften und mit Rücksicht auf den Endertrag." *Biologia Plantarum* 18 (November): 44–49. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02922333>
- Cole, K.S. und R.H. Cole, 1941 "Dispersion and absorption in dielectrics I. alternating current characteristics." *Journal of Chemical Physics* 9: 341–51. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1750906>
- Cseresnyés, I., Rajkai, K. und T. Takács, 2016 "Indirect Monitoring of Root Activity in Soybean Cultivars Under Contrasting Moisture Regimes by Measuring Electrical Capacitance." *Acta Physiologiae Plantarum* 38 (5). Springer: 121. doi: <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2149z>
- Dalton, F.N. 1995 "In-Situ Root Extent Measurements by Electrical Capacitance Methods." *Plant and Soil* 173 (1). 157–65. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00155527>
- Davis, C.A., Atekwana, E., Atekwana, E., Slater, L.D., Rossbach, S. und M.R. Mormile, 2006 "Microbial growth and biofilm formation in geologic media is detected with complex conductivity measurements" *Geophysical Research Letters*, 33, L027312.
- Desborough, C., 1997 "The impact of root weighting on the response of transpiration to moisture stress in land surface schemes", *Monthly Weather Review*, 125, 1920–1930, doi:10.1175/1520-0493(1997)125<1920:TIORWO>2.0.CO;2.
- Dietrich, R.C, Bengough, A.G., Jones H.G. und PJ White. 2013 "Can Root Electrical Capacitance Be Used to Predict Root Mass in Soil?" *Annals of Botany* 112 (2). 457–64. doi:[10.1093/aob/mct044](https://doi.org/10.1093/aob/mct044).
- Ellis, T., Murray W. und L. Kavalieris.,2013 "Electrical capacitance of bean (*Vicia faba*) root systems was related to tissue density—a test for the Dalton Model." *Plant and Soil* 366 (1-2). Springer: 575–84. doi:[10.1007/s11104-012-1424-z](https://doi.org/10.1007/s11104-012-1424-z).
- Eshel, A. und T. Beeckman, 2013. *Plant Roots: The Hidden Half, Fourth Ed.* CRC Press.
- Ghorbani, A., Cosenza, P., Ruy, S., Doussan, C., and N. Florsch: Non-invasive monitoring of water infiltration in a silty clay loam soil using Spectral Induced Polarization, *Water Resources Research*, 44, 1–18, doi:10.1029/2007WR006114, 2008.
- Gregory, P.J., Hutchison, D.J., Read, D.B., Jenneson, P.M., Gilboy, W.B. and E.J. Morton, 2003 "Non-invasive imaging of roots with high resolution X-ray micro-tomography." In *Roots: The Dynamic Interface between Plants and the Earth*, 351–59. doi:[10.1023/A:1026179919689](https://doi.org/10.1023/A:1026179919689).
- Heřmanská, A., Středa T. und O. Chloupek, 2015 "Improved Wheat Grain Yield by a New Method of Root Selection." *Agronomy for Sustainable Development* 35 (1). 195–202. doi:[10.1007/s13593-014-0227-4](https://doi.org/10.1007/s13593-014-0227-4).
- Kelter, M., Huisman, J., Zimmermann, E., and Vereecken, H.: Field evaluation of broadband spectral electrical imaging for soil and aquifer characterization, *Journal of Applied Geophysics*, 159, 484 – 496, doi:10.1016/j.jappgeo.2018.09.029, 2018.
- Flores Orozco, A., Williams, K. H., Long, P. E., Hubbard, S. S. und A. Kemna, 2011 "Using complex resistivity imaging to infer biogeochemical processes associated with bioremediation of an uranium-contaminated aquifer", *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116, 2156–2206, doi: 10.1029/2010JG001591.
- Flores Orozco, A.F., Williams, K.H. und A. Kemna, 2013 „Time-lapse spectral induced polarization imaging of stimulated uranium bioremediation.", *Near Surf. Geophys.* 11 (5), 531–544. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013020>.
- Mancuso, S. 2012 *Measuring Roots: An Updated Approach*. Springer Science & Business Media.
- Martin, T., 2009 „Anwendung des komplexen elektrischen Widerstandsverfahrens an Eichen (*Quercus* spp.)“, Dissertation Technische Universität Clausthal, BAM-Dissertationsreihe, Band 54.
- Martin, T., 2012 "Complex resistivity measurements on oak", *European Journal of Wood and Wood Products*, 70, 45–53.

- Martin, T. und T. Günther, 2013 "Complex Resistivity Tomography (CRT) for fungus detection on standing oak trees", *European Journal of Forest Research* 132 (5), 1-12.
- Martin, T., Nordsiek, S. und A. Weller, 2015 "Low-Frequency Impedance Spectroscopy of Wood", *Journal of Research in Spectroscopy*, Article ID 910447. DOI: 10.5171/2015.910447
- Marschner, P., 2012, "Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants", Academic Press, San Diego, third edition
- Nordsiek, S. und A. Weller, 2008 "A New Approach to Fitting Induced-Polarization Spectra." *Geophysics* 73 (6), F235–F245. doi:10.1190/1.2987412.
- Ntarlagiannis, D., Yee, N. und L. Slater, 2005 "On the low-frequency electrical polarization of bacterial cells in sands", *Geophysical Research Letters*, 32, L24402.
- Ntarlagiannis, D. und A. Ferguson, 2009 "SIP response of artificial biofilms" *Geophysics*, 74, A1-A5.
- Flores Orozco, A., Williams, K.H. und A. Kemna, 2013 „Time-lapse spectral induced polarization imaging of stimulated uranium bioremediation.", *Near Surf. Geophys.* 11 (5), 531–544. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013020>.
- Personna, Y.R., Ntarlagiannis, D., Slater, L., Yee, N., O'Brien, M. und S. Hubbard, 2008 "Spectral induced polarization and electrodic potential monitoring of microbially—mediated iron sulfide transformations" *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 113, G02020.
- Revil, A., und N. Florsch, 2010 "Determination of Permeability from Spectral Induced Polarization in Granular Media." *Geophysical Journal International* 181 (3). Oxford University Press: 1480–98. doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04573.x.
- Saneiyan, S., Ntarlagiannis, D. und Werkema, D.D. und A. Ustra, 2018 „Geophysical methods for monitoring soil stabilization processes", *J. Appl. Geophys.* 148, 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.12.008>
- Saneiyan, S., Ntarlagiannis, D., Ohan, J., Lee, L., Colwell, F. und S. Burns, 2019 "Induced polarization as a monitoring tool for in-situ microbial induced carbonate precipitation (MICP) processes", *Ecological Engineering* 127, 36-47.
- Schleifer, N., Weller, A., Schneider, S. und Junge, A. 2002 "Investigation of a Bronze Age plankway by spectral induced polarisation." *Archaeological Prospection* 9, 243-253.
- Schurr, J.M. 1964 "On the theory of the dielectric dispersion of spherical colloidal particles in electrolyte solution." *The Journal of Physical Chemistry* 68 (9): 2407–13. doi:10.1021/j100791a004.
- Seifert, D., 2005 "Experimental and numerical investigations of changes in flow and solute transport processes in porous media affected by bioclogging", Ph.D. thesis, Dan. Tech. Univ., Copenhagen.
- Seifert, D. und P. Engesgaard, 2007 "Use of tracer tests to investigate changes in flow and transport properties due to bioclogging of porous media", *J. Contam. Hydrol.*, 93(1–4), 58–71, doi:10.1016/j.jconhyd.2007.01.014.
- Weigand, M. und A. Kemna, 2017. "Multi-Frequency Electrical Impedance Tomography as a Non-Invasive Tool to Characterize and Monitor Crop Root Systems." *Biogeosciences* 14 (4): 921–39. doi:10.5194/bg-14-921-2017.
- Weigand, M. und A. Kemna, 2018. "Imaging and functional characterization of crop root systems using spectroscopic electrical impedance measurements." *Plant and Soil*. doi:10.1007/s11104-018-3867-3.
- Weigand, M., Zimmermann, E., Huisman, J.A. und A. Kemna. 2018. "Multi-frequency EIT monitoring at the field scale – Challenges and experiences from the first year." *Zenodo*, doi:10.5281/zenodo.1422694.
- Williams, K.H., Ntarlagiannis, D., Slater, L.D., Dohnalkova, A., Hubbard, S.S. und J.F. Banfield, 2005 "Geophysical imaging of stimulated microbial biomineralization" *Environmental Science and Technology*, 39, 7592-7600. doi:10.1021/es0504035.
- Williams, K.H., Kemna, A., Wilkins, M.J., Druhan, J., Arntzen, E., N'Guessan, A.L., Long, P.E., Hubbard, S.S. und J. F. Banfield, 2009 "Geophysical monitoring of coupled microbial and geochemical processes during stimulated subsurface bioremediation", *Environmental Science and Technology*, 43, 6717-6723.

DGG-Kolloquien

1988 - 2019

1988	Köln	Feldtechniken in der Landseismik
1989	Stuttgart	Unterstützung der seismischen Interpretation durch Bohrlochmessungen
1990	Leoben	Umweltgeophysik
1991	Bochum	Integrierte Interpretation in der Angewandten Geophysik
1992	Leipzig	Ingenieurgeophysik
1993	Kiel	Ausgewählte Themen aus der Marinen Geophysik
1994	Münster	Nichtseismische Verfahren in der Angewandten Geophysik
1995	Hamburg	Geophysikalische Bohrlochmessverfahren
1996	Freiberg	Fernerkundung - Remote Sensing
1997	Potsdam	Kolloquium ersetzt durch den "Internationalen Tag"
1998	Göttingen	Angewandte Geothermie
1999	Braunschweig	Satellitengeophysik
2000	München	Magnetik
2001	Frankfurt	Interpretation reflexionsseismischer Messungen
2002	Hannover	Neue Aspekte der Explorations- und Produktionsgeophysik
2003	Jena	Interdisziplinärer Einsatz geophysikalischer Methoden
2004	Berlin	Aerogeophysik
2005	Graz	Geophysik zur Vorerkundung von Tunneln
2006	Bremen	Georadar
2007	Aachen	NMR
2008	Freiberg	Geophysikalisches Monitoring
2009	Kiel	Polare Geophysik
2010	Bochum	Entwicklung geophysikalischer Messgeräte
2011	Köln	Induzierte Seismizität
2012	Hamburg	Angewandte Gesteinsphysik
2013	Leipzig	Stimulation & Fracking
2014	Karlsruhe	Geohazards – Landslides
2015	Hannover	Geohazards – Sinkholes
2016	Münster	Untergrundspeicherung
2017	Potsdam	Neue Entwicklungen in der Angewandten Seismik
2018	Leoben	Urbane Geophysik
2019	Braunschweig	Induzierte Polarisation

